

N. D'ORDRE :

37

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

RAYMOND MARTIN

Ingénieur E. T. P.

Ingénieur de l'École Supérieure de Perfectionnement Industriel.

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU REDRESSEMENT DES CLICHÉS AÉRIENS
ET A LA RÉOLUTION DE QUELQUES PROBLÈMES CONNEXES

2^{me} THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ:
ÉMULSIONS ORTHOCHROMATIQUES ET PANCHROMATIQUES.

31 JUIL 1937

Soutenues le 1937, devant la commission d'examen.

MM. E. DARMOIS
J. VILLEY
F. CROZE

Président.

} *Examineurs.*

N. D'ORDRE :

37

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

RAYMOND MARTIN

Ingénieur E. T. P.

Ingénieur de l'École Supérieure de Perfectionnement Industriel.

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU REDRESSEMENT DES CLICHÉS AÉRIENS
ET A LA RÉOLUTION DE QUELQUES PROBLÈMES CONNEXES

2^{me} THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ:
ÉMULSIONS ORTHOCHROMATIQUES ET PANCHROMATIQUES.

Soutenues le 1937, devant la commission d'examen.

MM. E. DARMOIS
J. VILLEY
F. CROZE

Président.

} *Examineurs.*

Faculté des Sciences de l'Université de Paris

MM.

Goyen honoraire. M. MOLLIARD.
Doyen. Ch. MAURAIN, *Professeur*, Physiquedu Globe.

Professeurs honoraires	H. LEBESGUE.	PÉCHARD.	MARCHIS.
	A. FERNBACH.	FREUNDLER.	VESSIoT.
	Emile PICARD.	AUGER.	PORTIER.
	Léon BRILLOUIN.	BLAISE.	MOLLIARD.
	GUILLET.	DANGEARD.	LAPICQUE.
		LESPIEAU.	

PROFESSEURS

G. BERTRAND	T	Chimie biologique.	ROBERT-LÉVY	T	Physiologie comparée.
M. CAULLERY	T	Zoologie (Évolution des êtres organisés).	F. PICARD		Zoologie (Évolution des êtres organisés).
G. URBAIN	T	Chimie générale.	Henri VILLAT	T	Mécanique des fluides et applications.
Émile BOREL	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	Ch. JACOB	T	Géologie.
Jean PERRIN	T	Chimie physique.	P. PASCAL	T	Chimie minérale.
H. ABRAHAM	T	Physique.	M. FRÉCHET	T	Calcul différentiel et Calcul intégral.
E. CARTAN	T	Géométrie supérieure.	E. ESCLANGON	T	Astronomie.
A. COTTON	T	Recherches physiques.	M ^{me} RAMART-LUCAS . .	T	Chimie organique.
J. DRACH	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	H. B GHIN	T	Mécanique physique et expérimentale.
Charles FABRY	T	Enseignement de Physique.	FOCH		Mécanique expérimentale des fluides.
Charles PÉREZ	T	Zoologie.	PAUTHENIER		Physique (P.C.B.).
Léon BERTRAND	T	Géologie structurale et géologie appliquée.	DE BROGLIE	T	Théories physiques.
E. RABAUD	T	Biologie expérimentale.	CHRÉTIEN		Optique appliquée.
M. GUICHARD	T	Chimie minérale.	P. JOB		Chimie générale.
Paul MONTEL	T	Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	LABROUSTE		Physique du Globe.
P. WINTREBERT	T	Anatomie et histologie comparées.	PRENANT		Zoologie.
L. BLARINGHEM	T	Botanique.	VILLEY		Mécanique physique et expérimentale.
O. DUBOSCQ	T	Biologie maritime.	BOHN		Zoologie (P.C.B.).
G. JULIA	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.	COMBES	T	Physiologie végétale.
G. MAUGUIN	T	Minéralogie.	GARNIER	T	Mathématiques générales.
A. MICHEL-LÉVY	T	Pétrographie.	PÉRÉS		Mécanique théorique des fluides
H. BÉNARD	T	Mécanique expérimentale des fluides.	HACKSPILL		Chimie (P.C.B.).
A. DENJOY	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	LAUGIER	T	Physiologie générale.
L. LUTAUD	T	Géographie physique et géologie dynamique.	TOUSSAINT		Technique Aéronautique.
Eugène BLOCH	T	Physique théorique et physique céleste.	M. CURIE		Physique (P.C.B.).
G. BRUHAT	T	Physique.	G. RIBAUD	T	Hautes températures.
E. DARMOIS	T	Enseignement de Physique.	CHAZY	T	Mécanique rationnelle.
A. DEBIERNE	T	Physique Générale et Radioactivité.	GAULT		Chimie (P.C.B.).
A. DUFOUR	T	Physique (P. C. B.).	CROZE		Recherches physiques.
L. DUNOYER	T	Optique appliquée.	DUPONT	T	Théories chimiques.
A. GUILLIERMOND . . .	T	Botanique.	LANQUINE		Géologie.
M. JAVILLIER		Chimie biologique.	VALIRON		Mathématiques générales.
L. JOLEAUD		Paléontologie.	BARRABÉ		Géologie structurale et géologie appliquée.
			MILLOT		Zoologie (P.C.B.).
			F. PERRIN		Théories physiques.
			VAVON		Chimie organique.
			G. DARMOIS		Calcul des probabilités et Physique-Mathématique.



Secrétaire A. PACAUD.
Secrétaire honoraire. D. TOMBECK.

A MES CHERS PARENTS

en temoignage de mon affection

A MON BEAU-PÈRE

en remerciement de ses précieux conseils

A MA FEMME

SOMMAIRE

<i>Avant-Propos</i>	5
---------------------------	---

Chapitre I.

A. Historique et développement de la Photogrammétrie.....	7
B. Examen succinct des problèmes actuels de la Photogrammétrie..	9
C. Où se situe la présente étude parmi ces problèmes généraux? Son objet et ses conséquences pratiques.....	16

Chapitre II.

ETUDE CRITIQUE DES MÉTHODES ET INSTRUMENTS DE REDRESSEMENT.

A. Généralités.....	19
B. Esquisse d'ensemble de la méthode Roussilhe.....	21
C. Contribution à l'étude de la restitution photographique en terrain accidenté.....	24
D. De quelques conceptions du problème de la carte dans l'espace	33

Chapitre III.

DU REDRESSEMENT PAR LE CALCUL ET PAR ABAQUE ET DE QUELQUES PROBLÈMES QUI S'Y RATTACHENT.

A. Quelques conventions relatives aux éléments d'un cliché....	39
B. Généralités sur le principe préconisé.....	41
C. Etude géométrique.....	42
D. Traduisons ceci par un abaque cartésien.....	45
E. Généralités sur deux questions intéressant le redressement et ayant fait l'objet d'études personnelles.....	50

<i>Conclusions</i>	61
--------------------------	----

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU REDRESSEMENT DES CLICHÉS AÉRIENS ET A LA RÉOLUTION DE QUELQUES PROBLÈMES CONNEXES

Avant Propos

La présente étude a pour but de rechercher spécialement quelques problèmes relatifs au *redressement* des clichés aériens, ces problèmes étant choisis parmi ceux qui nous sont apparus comme intéressant le plus les Sociétés d'exploitation ou les différents Services qui font appel en France aux méthodes et aux instruments de la Photogrammétrie.

Après avoir, dans notre *introduction*, esquissé un historique de la Photogrammétrie, — science assez ancienne puisque les origines s'en situent peu après l'invention de la photographie, — nous avons tenu à souligner l'importance actuelle de la question en énonçant les problèmes généraux qui se posent aujourd'hui. Nous y montrons que cette importance est principalement due à la guerre de 1914-1918 au cours de laquelle les avions, les appareils de prise de vues, la technique de la photographie aérienne, ont pris un essor considérable dont la Photogrammétrie bénéficie depuis bientôt vingt ans, qui lui a permis de progresser, d'étendre son rayon d'action et par conséquent ses champs d'application. Nous y expliquons enfin que, pour nous limiter, nous nous sommes tourné vers un cas particulier de la Photo-topographie (qui est la branche la plus importante de la Photogrammétrie) : *l'exploitation des clichés aériens considérés isolément par voie de redressement*, et que là, nous avons limité notre étude à quelques points essentiels en tenant compte de nos besoins, de l'économie de notre organisation propre et de l'intérêt général de la Photogrammétrie française.

Le chapitre II est un examen critique des méthodes et des instruments de redressement. Il importait en effet d'exposer d'abord les idées émises jusqu'à ce jour, qu'elles soient d'ordre purement géométrique (Laussedat, Sacconey), d'ordre optico-mécanique (appareils redresseurs par voie de projection) ou d'ordre analytique (relèvement dans l'espace par le calcul ou par le point approché). — Il importait aussi de les analyser et de les juger, ceci pour dégager les lacunes ou les imperfections qu'elles renferment et montrer l'intérêt de nos idées. Nous

avons profité de l'occasion qui nous en était offerte pour exposer l'analyse d'une étude personnelle sur la *restitution photographique en terrain accidenté*.

Le chapitre III est une contribution à l'étude du redressement par le calcul et par abaque et de quelques problèmes qui s'y rattachent. Le principe adopté ici est entièrement nouveau. Alors que les procédés géométriques (qu'il s'agisse de géométrie dans l'espace ou de géométrie descriptive) utilisent les angles issus du « cône perspectif », alors que les appareils redresseurs s'appuient sur la déformation d'un quadrilatère du cliché, nous avons jugé plus rationnel et plus simple d'étudier comment se comportait un segment de droite issu du point principal suivant son gisement dans son plan par rapport à la direction des horizontales et suivant l'inclinaison du cliché. La loi de cette déformation peut se traduire par un abaque cartésien à 3 variables $f_{123} = 0$, et l'utilisation de cet abaque nécessite seulement l'usage d'un appareil très précis de mesures de longueur (le 1/50 de mm par exemple). On aboutit en définitive à la connaissance des nombres i et Θ qui caractérisent le redressement; la projection photographique peut alors s'effectuer avec des appareils beaucoup plus simples que les appareils redresseurs existants et il n'y a plus qu'à tirer de cette projection les plans dont on peut avoir besoin. Il en résulte une plus grande rapidité d'exécution, une économie de matériel et surtout des conditions de travail plus normales au point de vue hygiène... Dans ce même chapitre nous avons joint enfin des considérations personnelles sur la préparation des missions aéro-photogrammétriques (étude d'un abaque cartésien à quatre variables) et sur les vols à hautes altitudes qui doivent tenir compte des facteurs : baisse de température, respiration artificielle, influence de la dépression atmosphérique sur l'organisme...

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur DORMOIS qui a bien voulu assurer la direction de mes études et la présidence de la Commission d'examen de cette thèse, Monsieur le Professeur VILLEY et Monsieur le Professeur CROZE. J'exprime toute ma gratitude à Monsieur le Général PERRIER, membre de l'Académie de Sciences et Président de la Section de photogrammétrie à la Société française de Photographie, dont l'exemple et les conseils me furent si souvent de la plus haute utilité, ainsi qu'à Monsieur ROUSSILHE qui, il y a bientôt douze ans, à l'Ecole des Travaux Publics, a su me présenter et me faire aimer la Photogrammétrie. Je remercie enfin Monsieur EYROLLES, Directeur de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics qui a bien voulu faciliter, dans ses laboratoires, mes recherches expérimentales, auquel j'associe de tout cœur Monsieur YADOFF, Chef du Service des Recherches, si actif, si dévoué, à qui je dois une grosse partie des modestes résultats contenus dans le présent travail.

CHAPITRE I.

A. HISTORIQUE ET DEVELOPPEMENT DE LA PHOTOGRAMMETRIE

Il paraît opportun de résumer en premier lieu *l'historique des études et des travaux*, qui, depuis plus d'un siècle, ont assuré, tant en France qu'à l'Etranger, le développement de la Photogrammétrie, science dont les applications actuelles sont considérables et dont l'avenir permet les plus grandes espérances.

Les faits principaux qui furent à la base de l'évolution de la photogrammétrie, sont les suivants : a) Etude systématique des lois de la perspective; b) Invention de la photographie et applications presque immédiates du savant français LAUSSEDT; c) Naissance de l'aviation; ses progrès pendant la guerre; ses applications comme moyen de transport des appareils de prises de vues aériennes.

L'idée d'appliquer les propriétés des perspectives à la représentation des objets remonte à une époque fort éloignée et certains auteurs rappellent que déjà au 15^e siècle des peintres employaient « des artifices mécaniques très simples pour constituer le dessin régulier de leurs tableaux ». Mais il faut se reporter au début du 17^e siècle avec DESARGUES et au 18^e avec LAMBERT pour voir apparaître les premières études systématiques des lois de la perspective, qu'ensuite des savants tels que PONCELET, MONCE, CHASLES et plus récemment M. d'OCAGNE ont poussé très loin en même temps que les techniciens en recherchaient les applications.

Cependant, le véritable point de départ de la science photogrammétrique — ou plus exactement à cette époque de la *métrophotographie* — se situe vers 1845, quelques années après l'invention de la photographie par NIEPCE et DAGUERRE; et c'est un savant français, le Colonel du Génie LAUSSEDT, qui, appliquant les principes de BEAUTEUPS-BEAUPRE à la chambre claire de Wollaston réalise les premières restitutions de photographies terrestres... Il n'entre pas dans le cadre de ce court historique de décrire, ni même de résumer l'œuvre de LAUSSEDT, travailleur infatigable et savant malheureusement incompris qui eut à lutter pendant soixante ans, non seulement contre les difficultés inhérentes à toute science nouvelle, mais contre l'inertie des Pouvoirs Publics, contre l'obstruction même de ceux qui auraient dû le soutenir, à tel point qu'en 1871 on supprimait la brigade photo-topographique du lieutenant JAVARY, collaborateur de LAUSSEDT, en même temps que les Allemands appliquaient ses idées aux sièges de Strasbourg et de Paris. Mais nous

constaterons cependant que ce grand savant, poursuivant envers et contre tous ses recherches personnelles eut des élèves et des continuateurs parmi lesquels, à côté du lieutenant JAVARY, il convient de noter LEBON, BATTUT, LEGROS, WENTZ, GAUTIER, et au début du 20^e siècle les frères H. et J. VALLOT (1) ainsi que le capitaine SACONNEY, à qui l'on doit les premiers essais systématiques de photographie aérienne par cerf-volant.

A l'Etranger, l'œuvre de LAUSSEDAT ne tarda pas à s'infiltrer : En Italie avec PORRO 1863, en Allemagne avec MEYDENBAUER 1867, en Espagne 1862 avec TERRERO sous l'impulsion de LAUSSEDAT lui-même. Et comme toujours cela se produit en matière scientifique, on vit nos idées se répandre, se diffuser, s'appliquer chez nos voisins, avec une

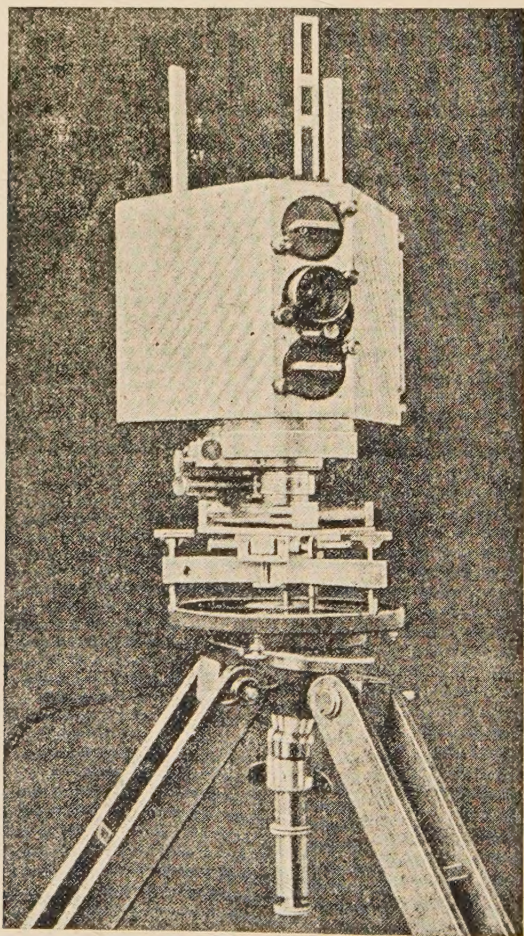


Photo-tachéorètre d'après H et J VALLOT.

1) Brillants topographes qui s'illustrèrent parmi leurs remarquables travaux du 1/1000 au 1/20.000, la plupart en haute montagne.

allure qui ne tarda pas à nous laisser assez loin en arrière; on vit apparaître :

En Allemagne : VOGEL, KOPPE, HAUCK, FINSTERWALDER.

Au Canada : DEVILLE.

Aux Etats-Unis : FLEMER.

En Autriche-Hongrie : MAURER, SCHIFFNER, DOLEZAL.

En Italie : MANZI, FERRERO,

dont les travaux se développent parallèlement à la science photographique, c'est-à-dire au fur et à mesure que les émulsions, les objectifs et surtout les chambres de prises de vues se perfectionnèrent et devinrent de plus en plus des « outils » permettant de réaliser sur des plaques des perspectives exactes, au sens géométrique du mot.

Soulignons qu'au Canada, l'œuvre de DEVILLE (ancien officier de la marine française, entré par la suite au service topographique d'Ottawa) eut une importance considérable dans le développement de la photogrammétrie en posant le principe de l'application de la *stéréoscopie* aux clichés considérés par couples pour le tracé des courbes de niveau (1895), et qu'en Allemagne, le Docteur PULFRICH avec son *stéréocomparateur* (1901) et son *stéréoplanigraphe* (1903) lançait définitivement la stéréophotogrammétrie terrestre dans la voie des applications précises.

Voici une citation des savants, ingénieurs ou techniciens divers qui depuis 1900 ont contribué au développement de la photogrammétrie et de la stéréophotogrammétrie (1) :

France : ROUZET, SACONNEY, H. et J. VALLOT, CALLOT, CLERC, LABUISSIÈRE, VAVON, ROUSSILHE, POIVILLIERS, PREDHUMEAU.

Allemagne : SCHILLING, HAUCK, RITTER, KAMERER, HUGERSHOFF, CRANTZ, ZEISS, HEYDE, ACHENBRENNER, BANNERSFELD, VON GRUBER.

Italie : IORIA, RANZA, TARDIVO, CASSINIS, CLEMENTI, SANTONI, NISTRI.

Autriche-Hongrie : SCHEIMPFLUG, VON OREL.

Hollande : VAN RIEL.

Etats-Unis : FLEINER, BAGLEY.

Russie : THIELLE.

Espagne : TERRERO, GALBIS, MAS Y ZUALDA, TORROJA, BADEL.

Angleterre : MAC CAW, HOTINE, WINTERBOTHAM.

Suisse : BALTENSPERGER, WILD, BERTSCHMANN.

Au début du 20^e siècle, le problème de la photographie aérienne commença à passionner certains chercheurs et à intéresser les Pouvoirs Publics. Dès 1900, les *Officiers du Génie* français utilisèrent le ballon comme moyen de transport de l'appareil de prise de vues (campagne de Chine) et jusqu'en 1914, ils ne cessèrent d'étudier la question. De son côté le capitaine SACONNEY se livra à des expériences absolument remarquables, reconnaissant bien vite les inconvénients des cerfs-volants, ballons, voire même dirigeable et préconisait dès 1908 l'emploi de l'avion. Vint ensuite la *Grande Guerre* au cours de laquelle on vit progresser parallèlement et d'une façon foudroyante l'aviation et les applications de la photographie aérienne. Il était donc naturel qu'en 1918 on cherchât à utiliser pour des buts de paix, pour des buts de reconstitution

1) H. Roussilhe — Emploi de la photographie aérienne pour les levés topographiques à grandes échelles.

les résultats obtenus pendant les hostilités. La photogrammétrie en bénéficia: des problèmes nouveaux apparurent; dans tous les pays, chercheurs, constructeurs, usagers se multiplièrent. Et aujourd'hui nous nous trouvons en face d'une véritable industrie qui a des perspectives d'avenir brillantes et presque illimitées.

B. — EXAMEN SUCCINCT DES PROBLEMES ACTUELS DE LA PHOTOGRAMMETRIE

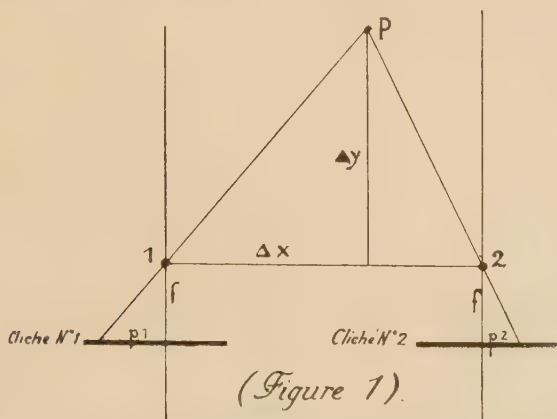
I. — Le problème le plus simple est celui de *la photographie aérienne en terrain rigoureusement plat*. Si nous supposons l'axe optique parfaitement vertical au moment de la prise de vues, si nous admettons que l'appareil photographique soit parfait et que les milieux traversés ne troublent en quoi que ce soit les lois de la perspective, si les surfaces émulsionnées reproduisent, après impréssion et développement, l'image sans déformation, si enfin nous pouvons considérer comme pratiquement nulles les causes d'erreurs inconnues, *la photographie obtenue est un plan à une échelle E*. Cette échelle est déterminé par un calcul immédiat si l'on connaît *exactement* la hauteur de l'avion au-dessus du sol ou si une longueur *suffisamment grande* a été mesurée entre 2 points facilement identifiables sur le cliché. Pour passer de l'échelle E à l'échelle que l'on désire, une lanterne de projection suffit.

II. — *Pratiquement l'axe optique de l'appareil de prise de vues n'est jamais parfaitement vertical*, mais si nous supposons réalisées toutes les autres conditions énumérées au paragraphe précédent, nous savons qu'il est possible de passer de l'image fixée sur le cliché à celle que l'on aurait obtenue si la verticalité de l'axe optique avait été réalisée nous retombons alors dans le cas précédent. L'opération à effectuer porte le nom de *redressement*. Le problème nécessite la connaissance au sol d'au moins trois points identifiables sur le cliché; sa résolution, c'est-à-dire la recherche des éléments de la perspective, ne peut plus être effectuée avec une lanterne de projection ordinaire. Il faut adjoindre à celle-ci des organes de mesure et tenir compte de certaines propriétés optiques inhérentes à l'obliquité du cliché. Malgré cela le problème demeure encore assez simple et *l'image photographique nous apparait comme un plan vu de biais*.

III. — *Dans le cas le plus général, la surface du sol n'est pas plane*. La divergence entre la projection *orthogonale* que nous recherchons et la projection *conique* donnée par le cliché saute alors aux yeux. Considérons en effet un détail (angle de bâtiment, par exemple) se déplaçant sur la droite qui le joint à l'appareil photographique : sa projection orthogonale est mobile, sa projection conique est fixe. Cette dernière est donc erronée et il faut la corriger. L'opération nécessaire s'appelle *la restitution* et elle implique la connaissance de l'élément nivellement. Le problème de la restitution est demeuré longtemps très imparfait; il fait actuellement l'objet de recherches sérieuses et certaines conceptions semblent être sur point d'aboutir.

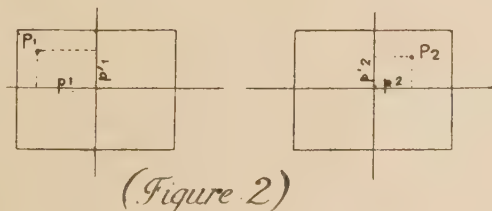
Les cas que nous venons d'examiner constituent la photogrammétrie *par clichés considérés isolément*. Ils s'appliquent particulièrement à la détermination de la planimétrie (coordonnées x et y) et nous avons vu, dans le cas général, que la connaissance préalable de l'altimétrie (coordonnée z) était nécessaire. D'autres conceptions sont donc à envisager; elles font l'objet de la photogrammétrie *par couples de clichés*.

IV. — Le problème le plus simple dans cette ordre d'idées est celui de la *restitution d'un point P photographié de 2 points de vues différents, les clichés étant contenus dans le même plan vertical, les stations étant dans un même plan horizontal contenant le point P et distantes d'une longueur connue (base). Il s'agit là évidemment de photographies terrestres et les axes optiques sont horizontaux. Si nous supposons connues très exactement la longueur f de l'appareil de prise de vues et que l'on puisse considérer comm négligeables les causes d'erreurs énumérées au paragraphe I, la solution du problème se dégage immédiatement de la figure 1 dans laquelle le plan du tableau est le plan horizontal passant par les 2 stations photographiques et le point P .*



Un jeu de triangles semblables dans lesquels on connaît f et la base 1-2 et où on a mesuré P_1 et P_2 sur les clichés, donne en effet immédiatement Δx et Δy , d'où les coordonnées de P par rapport à 1 (l'une des stations). Remarquons que dans ce cas simple il n'a été question que de planimétrie.

V. — La notion de nivellement apparait si nous supposons le point P situé en dehors du plan horizontal passant par les 2 stations photographiques. Les images du point P sur les clichés sont alors définies en P_1 et P_2 sur la figure 2.



La projection horizontale des 2 visées sur un plan horizontal de référence nous fait retomber dans le problème de la figure 1 et nous obtenons les coordonnées partielles Δx et Δy . La projection verticale du même système sur un plan vertical de référence nous donne la coordonnée partielle Δz .

VI. — On peut maintenant concevoir des cas plus complexes : (Stations photographiques à des altitudes différentes. Clichés dans des plans verticaux différents mais parallèles. Clichés dans des plans verticaux différent non parallèles) et arriver finalement au problème général : *Chambres quelconques dans l'espace*. C'est le cas d'un opérateur qui tient son appareil à la main et qui, de deux points de vue arbitraires, photographie une même zone; c'est aussi ce qui se passe en photographie aérienne lorsque sur une même ligne de vol on prend des clichés à quelques secondes d'intervalle.

La résolution de ce problème général repose d'ailleurs aussi sur le principe de l'intersection de 2 droites dans l'espace. Si par un moyen quelconque (en utilisant par exemple des éléments topographiques du terrain photographié) nous parvenons à situer chaque chambre dans l'espace (coordonnées x , y et z), si nous pouvons déterminer la direction de chaque axe optique ainsi que l'orientation des clichés dans leur plan, il est possible, après développement des 2 plaques photographiques de reconstituer l'espace dans un laboratoire. Pour cela en effet, replaçons les clichés dans les chambres; à une échelle assez petite donnons à ces chambres la même position relative qu'elles avaient au moment de la prise de vues; et considérons les droites passant par le centre optique de chaque chambre et par tous les points de chaque cliché dont nous désirons la restitution. Ces droites se coupent deux à deux et définissent les points en question. Le lieu géométrique de ces points est une figuration réduite du modèle du sol ou image plastique. Ainsi au moyen de 2 clichés on a le terrain « à domicile ». Il ne reste plus qu'à en tirer des plans et des cartes. Pour des raisons évidentes cette réalisation est complexe et pose des problèmes excessivement délicats que nous diviserons en deux groupes principaux :

a) *Ceux tendant à la définition de l'image plastique.*

b) *Ceux tendant à l'exploitation de cette image plastique* (restitution de la planimétrie et de l'altimétrie).

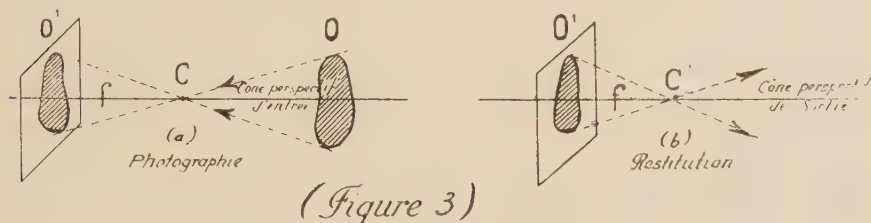
En résumé deux conceptions apparaissent en photogrammétrie : la première s'appuie sur des clichés considérés isolément et résoud seulement une partie du problème; la seconde s'appuie sur des clichés considérés par couples et permet une restitution complète. Dans le premier cas on utilise des propriétés projectives; dans le second on a recours à l'intersection de droites dans l'espace. Les réalisations mécaniques ou optiques qui s'imposent alors sont complexes à cause des précisions exigées dans les résultats, à cause aussi de la nécessité d'en baisser les prix de revient, si l'on veut que la photogrammétrie soit, économiquement parlant, d'un rendement supérieur à la topographie pure.

VII. — Les photographies prises par un amateur avec son 9×12 à plaques ou avec son kodak à pellicules ne sauraient être considérées

comme suffisantes en matière de photogrammétrie, pour la raison bien simple que l'image qui en découle *n'est généralement pas une perspective correcte* au sens théorique du mot.

A cette considération d'ordre technique, s'en ajoute une autre d'ordre économique et ensemble elles posent le problème *des appareils de prises de vues*.

L'objet O (figure 2) émet des rayons passant par le centre C et dont le faisceau constitue ce que nous appellerons *le cône perspectif d'entrée* (état initial); après obturation, développement du cliché, remise en place dans la chambre, l'image O' engendre par projection un *cône perspectif de sortie* (état final). Il doit y avoir coïncidence parfaite entre l'état initial et l'état final et cela suppose réalisées certaines conditions s'appliquant : à l'objectif, à l'obturateur, au bâti de la chambre photographique, aux émulsions et à leur support. Précisons :



(Figure 3)
Reconstitution du faisceau lumineux.

Nous avons vu que la qualité primordiale d'un cliché photogramétrique était d'être *géométriquement correct*. Considérons la figure 3a. Le faisceau de rayons constituant le cône perspectif d'entrée doit donc, après avoir traversé *l'objectif*, pénétrer dans la chambre sans déformations; cela suppose évidemment des qualités optiques extrêmes dont la recherche préoccupe savants et spécialistes depuis plusieurs années. On connaît d'autre part les difficultés de *l'obturation*. *L'obturateur à rideau* qui permet de réaliser des temps d'exposition extrêmement courts, déforme l'image; il suffit pour s'en convaincre d'observer la photographie d'une automobile de course lancée à toute vitesse; les roues apparaissent ovales et en général les proportions de l'objet sont détruites. On a recours alors *aux obturateurs d'objectifs* dont le calcul et la construction sont d'autant complexes que le diamètre de la pupille d'entrée est plus grand; et cette difficulté tient à l'inertie des masses métalliques dont la réaction s'oppose aux grandes vitesses que l'on doit réaliser pour rendre négligeables les incorrections d'image dues aux vibrations, à la mobilité de l'avion, aux perturbations de l'axe optique sous l'influence des mouvements désordonnés de l'avion.

Supposons alors que par l'emploi d'un objectif parfait monté sur une chambre géométriquement parfaite, munie d'un obturateur parfait, l'image se formant dans le plan focal, soit, suivant l'expression consacrée, « *géométriquement correcte* ». Cette image est réelle mais fugitive et *il faut la fixer sans la déformer*. On la reçoit comme chacun sait sur une surface sensible et tout va bien, si cette surface sensible est *parfaitement plane*, si elle est montée sur un support dont la rigidité n'est

pas influencée par le développement, si les *grains* qui la constituent ont un diamètre négligeable par rapport aux plus petits détails que l'on veut discriminer, si sa *sensibilité* est en rapport avec les vitesses d'obturation et avec les lois de la lumière, etc... problèmes ardues à résoudre, les plus importants peut-être de la photogrammétrie et de la solution desquels dépend en particulier l'amélioration de la limite de précision numérique obtenue actuellement en nivellement photo-aérien. Ce n'est pas tout ! Du point de vue économique on découvre certains aspects de la question auxquels s'attachent d'autres problèmes importants : nous citerons en premier lieu celui qui a trait à la *manipulation des surfaces émulsionnées*.

Amener une pareille surface exactement dans le plan focal d'un appareil photographique aménagé spécialement pour la recevoir n'est rien; réitérer l'opération plusieurs centaines de fois, à une cadence rapide et sans accrocs, devient très compliqué. On se tourne à cet effet, du côté des supports souples (pellicules) et on se heurte à leur *instabilité*; s'il s'agit de plaques on utilise des magasins de faible ou grande capacité dont le poids, l'encombrement, les dérèglages sont très préjudiciables à la réussite de l'opération : Témoin le magasin Gaumont (non encore détrôné), du poids de 10 kilos, destiné à la manipulation de 12 plaques 18×24 (poids 1 kg. 3). Des conceptions nouvelles apparaissent heureusement et l'automatisme y tient une place prépondérante; la question cependant est loin d'être résolue.

Autre problème : les *émulsions spéciales*. On connaît les conditions météorologiques nécessaires pour obtenir avec des émulsions spéciales de bons clichés photographiques et on n'a aucune peine à en déduire le *nombre annuel de journées favorables à l'obtention de ces clichés*. Ce temps est très court et il faut l'utiliser au maximum; dans ce but, on met simultanément en chantier plusieurs avions et on s'arrange de telle sorte que le nombre de clichés-heure-avion soit maximum. L'emploi d'émulsions spéciales sensibles aux radiations infra-rouges (radiations qui, comme on le sait, ont la propriété de «percer la brume») est de nature à améliorer considérablement ce chiffre. Les réalisations pratiques dans cet ordre d'idées sont encore bien faibles mais leur intérêt est si grand qu'elles méritent d'être suivies et encouragées sans réserves.

Et nous sommes amenés tout naturellement à constater qu'il ne suffit pas de prendre en un temps déterminé le plus grand nombre possible de clichés, puisque le rendement — digne objet de nos préoccupations — est aussi fonction de la *superficie photographiée sur le cliché*. Nous allons alors porter notre attention sur le choix de la *longueur focale* étudiée en connexion étroite avec l'échelle du plan, sur l'examen délicat du *champ des objectifs* et sur la conception des *multichambres* : problèmes d'actualité qui reçoivent des solutions différentes suivant les tendances, les moyens, les buts de ceux qui les résolvent, mais qu'il importe de suivre attentivement, si l'on veut juger sainement et choisir judicieusement.

En résumé, les problèmes relatifs aux appareils de prises de vues aériennes apparaissent nombreux et complexes. Comme ceux de la restitution, ils sont tributaires des précisions exigées et du rendement, notions antagonistes qui en compliquent la résolution. Il s'appliquent

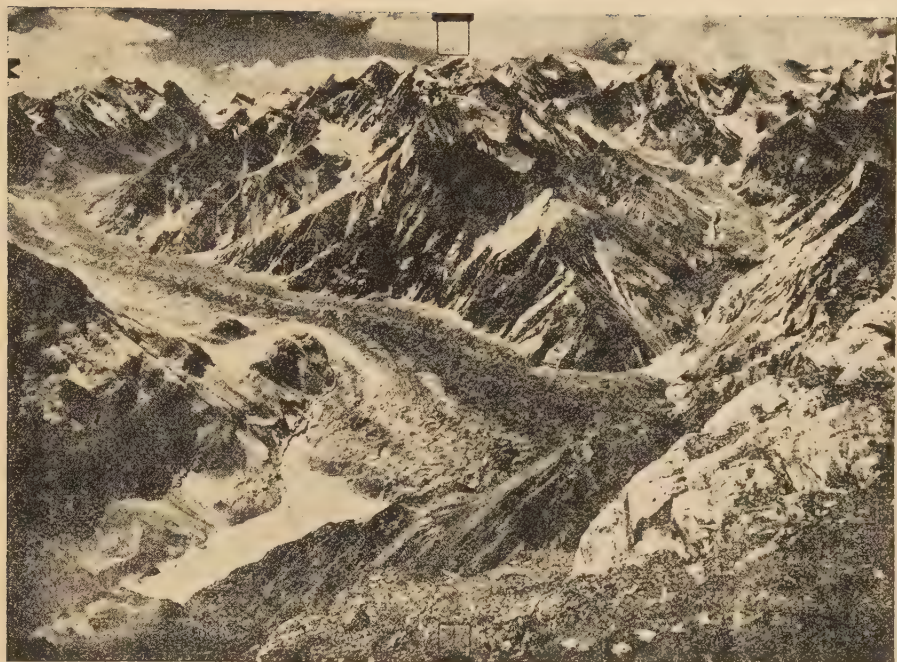


Fig. 4. Lever au photo-théodolite d'une langue du glacier de Fend-tchenko avoisinant le groupe du Garmo à 7500^m.

principalement : a) à la constitution même de l'appareil (bâti, objectif, obturateur) ; b) à son maniement (magasins) ; c) aux émulsions utilisées (intérêt particulier des radiations infra-rouges) ; d) à des études particulières sur le choix des focales, le champ des objectifs et sur une conception dérivée : la multichambre. Ils ont tous leur importance propre et si parfois, pour des raisons locales ou passagères, la Science ou l'Industrie en néglige quelques-uns, on ne tarde pas à constater les lacunes provoquées par ce manque d'homogénéité.

VII. — Il ne suffit pas d'avoir en main un instrument idéal pour obtenir de bons résultats ; il faut encore savoir s'en servir. Certaines conceptions basées sur la substitution totale de la machine à l'homme, tendent à contredire cette assertion ; on en connaît les effets. En matière de photogrammétrie, science neuve et hésitante, la question ne se pose même pas, et si quelqu'échauffé voulant jouer les « Jules Verne » nous dépeint parfois le règne imminent de l'automatisme intégral, on ne tarde pas à reconnaître en lui un ignorant, un illuminé, ou un charlatan. En topographie on préconise d'associer intimement l'instrument, l'opérateur, la méthode. Pourquoi la photogrammétrie — forme particulière de l'art du mesurage — échapperait-elle à cette règle ?

Les problèmes généraux de la prises de vues aériennes découlent évidemment des études suivantes : a) moyens de transports (aviation), b) préparation et exécution des missions, études auxquelles s'attachent

inplacablement les notions de rendement et de précision déjà mises en relief.

On sait en effet, que les difficultés inhérentes à l'aviation sont innombrables; elles teignent à la *climatologie* (nuages, brumes, vents); aux *terrains d'atterrissage* trop rares et généralement insuffisants, à l'*insécurité* qui existe encore, quoi qu'on en dise, malgré les progrès incessants réalisés en ce sens. Elles tiennent aussi aux types d'avions et au chiffre très élevé du *prix-horaire*. Elles résident dans la nécessité de réaliser strictement le programme que l'on s'est imposé par des vols de *haute précision*. Elles se compliquent considérablement dans le cas des *vols d'altitude* puisque des aménagements spéciaux (chauffage intérieur, respiration artificielle) interviennent. Et les problèmes qui en découlent sont ardues.

D'autre part, admettons bien définis le choix de l'appareil et celui des émulsions et supposons que l'on dispose de l'avion répondant le mieux aux besoins de la cause. Restent à préparer et à exécuter la mission photographique. La *préparation du vol* est simple; elle s'appuie sur des relations élémentaires de géométrie se calculant à la *règle ou par abaques* et aboutit à la détermination d'éléments dont les principaux sont : altitude, équidistance entre les lignes de vol, temps entre deux déclenchements successifs. L'*exécution* est un autre problème, car on n'évolue pas dans l'espace comme en automobile sur une place. La *navigation aérienne de haute précision* est difficile; l'instabilité de l'air et l'irrégularité de ses mouvements rendent pénible la marche d'avion; la *dérive* intervient qu'il convient de déterminer et de corriger; il faut compter avec les *remous*, les *chutes d'altitude*, les *variations du vent* impliquant des modifications de cap. Si l'avion marche correctement, c'est la question de *luminosité* qui intervient, le réglage de l'ouverture de l'objectif, fonction de cette luminosité et de la nature des émulsions, la nécessité d'interposer des *écrans* et de faire varier les *vitesse d'obturation* ? Dans un autre ordre d'idées, il faut compter avec les *vibrations* de l'avion qu'il est difficile d'annuler complètement sans étude méthodique. Et d'une façon générale, disons qu'il faut prévoir et que la moindre lacune dans cet ensemble de mouvements ou d'opérations qui concourent à l'obtention d'un bon cliché aérien est de nature à tout compromettre.

En ce qui concerne les photographies terrestres, nous avons montré qu'elles n'étaient qu'un cas particulier de la photographie aérienne, mais elles s'en détachent au point de vue exécution. Les difficultés sont d'un autre ordre, mais elles sont moindres. Elles ont un caractère plutôt topographique et l'instrument utilisé est le *photothéodolite*.

C. — OU SE SITUE LA PRESENTE ETUDE PARMI CES PROBLEMES GENERAUX? SON OBJET ET SES CONSEQUENCES PRATIQUES

Les clichés aériens, pris avec l'axe optique à peu près vertical, sont donc traités, soit séparément, soit par couples. Dans le premier cas, on opère un *redressement* (voir plus loin, chapitre II, la définition du redressement) et une *mise à l'échelle* de chaque cliché par voie de

projection photographique (appareils utilisés: Redresseur Roussilhe, redresseur Zeiss, redresseur Wild). Dans le second cas, on reconstitue au laboratoire l'espace commun à deux clichés consécutifs et par application de propriétés diverses (observation stéréoscopique, double projection, anaglyphes) on définit en x , y , z la position de points convenables de la surface du sol (appareils utilisés: stéréotopographe Poiwilliers, Autographe Wild, stéréotopographe Bauersfeld-Zeiss, Aéro-cartographe Santoni, Appareils à double projection Gallus-Ferber et Nistri, Multiplex-anaglyphe Zeiss).

Les problèmes qui seront traités ici appartiennent tous au premier cas; ils constituent une contribution à l'amélioration ou au développement de certains procédés de redressement. *Nous avons été amené à les étudier parce que depuis plusieurs années, nous avons constaté que les problèmes de photo-topographie traitant de l'exploitation des clichés aériens considérés isolément, quoique nombreux variés et utiles sont loin d'être tous résolus.* Et si l'on examine les tendances qui se manifestent depuis quelques années, en France et à l'étranger, dans les méthodes et les instruments, on constate que ceux-ci sont négligés au profit de ceux basés sur l'observation des clichés par couples. C'est ainsi que les firmes Wild et Zeiss ont produit récemment chacune un redresseur excessivement bien construit, très précis, très maniable, comportant le maximum d'automatisme, mais ne mettant en relief aucune idée vraiment nouvelle de nature à vulgariser le procédé du redressement ou à rendre meilleurs les résultats obtenus. Il semble qu'actuellement on soit trop enclin à vouloir résoudre les problèmes « en force », à vouloir intercaler entre l'élément initial (la plaque) et l'élément final (le plan), — éléments d'ailleurs très près l'un de l'autre — trop d'organes intermédiaires optiques et mécaniques, c'est-à-dire trop de causes d'erreurs et aussi trop... d'argent. En quoi consiste le redressement d'un cliché? A la détermination de 2 quantités: l'inclinaison i de la ligne de plus grande pente et l'orientation Θ de cette ligne par rapport à l'image. C'est tout !... Ce qu'il importe de chercher à notre avis c'est : 1° — un gain de précision sur les quantités i et Θ ; 2° — une réduction de temps passés ; 3° — un matériel simple et peu coûteux.

Par contre, — et ceci pour nous guider, — enregistrons des résultats. Constatons qu'actuellement en France on établit couramment et dans de bonnes conditions les plans photographiques quelles que soient les dénivellations du sol ; notons à l'étranger les remarquables travaux du Général NENONEN sur le redressement par vues de l'horizon et les efforts produits dans les Pays-Bas, avec le concours de la firme Zeiss pour tirer un meilleur parti des photographies redressées ; disons-nous que certains services techniques étrangers se tournent actuellement vers les méthodes préconisées dans le redressement et organisent des essais méthodiques. Chez nous, en particulier, on se livre actuellement (mois de Mai, Juin, Juillet 1937) à des expériences comparatives sur les applications de la photo-topographie dans les releveurs cadastraux : redressements et plans photographiques d'une part, stéréo-photo-restitution d'autre part. Incontestablement, ces expériences sont du plus haut intérêt car elles permettront de chiffrer, si elles sont poussées assez loin, des temps passés, des prix de revient, et, en outre, elles aboutiront vraisem-

blablement à l'élaboration d'une méthode de travail pour le cas considéré. *S'il nous est permis de faire ici, dans cette thèse, une prévision*, nous dirons que nous croyons intéressante la méthode stéréophotogramétrique à condition : 1° de signaler préalablement le parcellaire ou tout au moins une très grosse partie ; 2° d'envisager en même temps la définition de l'altimétrie. S'il s'agit d'une simple *révision* ou même d'une réfection comportant seulement la projection horizontale du parcellaire avec une bonne précision graphique, nous pensons qu'en rapidité, coût sécurité, la méthode du *redressement*, traitée sans fantaisie bien entendu et par des gens connaissant à fond leur métier, doit se révéler supérieure à la méthode de restitution des clichés par couples.

... *Compte tenu de ce qui vient d'être dit, compte tenu aussi de nos besoins les plus immédiats*, après nous être livré à une étude critique des méthodes et instruments de redressement (1) nous exposerons une solution du redressement qui à notre avis n'a encore été envisagée ni à l'étranger, ni en France. Voici d'ailleurs l'énoncé du problème traité : *Comment se déforme au sol un segment de droite (de longueur constante sur le cliché) issu du point principal du cliché, suivant son gisement dans son plan pris par rapport à la direction des horizontales et suivant l'inclinaison de ce cliché ?* Nous verrons comment après avoir étudié la loi de cette déformation, loi facile à représenter graphiquement par un abaque cartésien, l'opération du redressement pourra s'opérer simplement en utilisant par cliché 4 mesures linéaires évaluées avec une précision de l'ordre du 1/30 de m/m et en les confrontant, par l'intermédiaire de l'abaque, avec leurs homologues sur le terrain, déterminés par les procédés classiques de la topographie. Nous obtiendrons ainsi les quantités i et Θ déjà définies, quantités qui introduites dans un appareil de projection convenablement adapté permettront d'obtenir rapidement une photographie redressée du terrain, mise à l'échelle et contenant tous les éléments de la restitution, c'est-à-dire : Direction de la ligne de plus grande pente et image du pied de la verticale de l'avion. *Avantages de cette conception* : les 3/4 au moins du redressement opérés en dehors du laboratoire avec un matériel très peu coûteux ; possibilité d'utiliser dans une seule pièce, *et en pleine lumière*, plusieurs opérateurs simultanément ; simplification et diminution considérable du nombre des appareils de projection ; gain de précision sur les quantités i et Θ ; enfin vulgarisation de la méthode de redressement qui pourra être appliquée, non seulement par les entreprises spécialisées mais aussi par un certain nombre de topographes dont les travaux seront susceptibles de s'y adapter. Enfin, par nécessité nous serons amenés à donner quelques considérations personnelles sur la *préparation des vols spécialement effectués pour ce genre de travaux*, quelques considérations personnelles sur les vols à haute altitude qui ont pour effet de réduire considérablement le nombre de points à relever au sol.

1) Etude comprenant : a) généralités—b) esquisse d'ensemble de la méthode Roussilhe; c) Contribution à l'étude de la restitution photographique en terrain accidenté; d) de quelques conceptions de problème de la carte dans l'espace,

ETUDE CRITIQUE DES METHODES ET INSTRUMENTS DE REDRESSEMENT

A. GENERALITES

I. Définition du redressement.

Considérons la figure 4. Au moment de la prise de vues, le cliché C avait une position absolument quelconque dans l'espace. S'il avait été parfaitement horizontal (position CR), l'image a, b, c, d d'un certain contour ABCD eût été $a' b' c' d'$. Par définition, ce quadrilatère $a' b' c' d'$ résulte du *redressement* du quadrilatère a, b, c, d , de même que l'image portée par le cliché CR est une image *redressée* de celle portée par le cliché C. On peut passer de C à CR par projection. Nous remarquons que le cliché CR n'est pas un plan ¹⁾, et que son échelle peut être quelconque. Sa particularité réside en ce fait qu'il est parallèle à l'un des plans de coordonnées et que des pro-

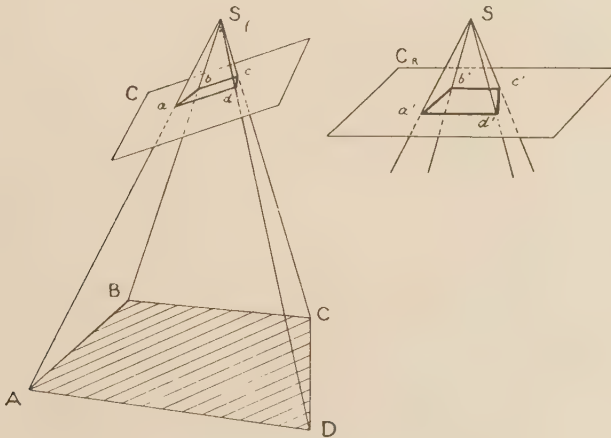


Fig. 5. Définition du redressement.

priétés géométriques simples permettent d'en tirer un plan à une échelle déterminée. Et en ce sens, l'on peut dire que le redressement constitue la première étape de la *restitution*, qui, comme son nom l'indique,

1) Sauf dans le cas particulier où le terrain est plat.

consiste à « rendre » sous forme de planimétrie et d'altimétrie ce que l'on a « pris » et fixé sur une plaque sensible. La place que tient le redressement dans la restitution est donc variable et nous pouvons la caractériser de la façon suivante: a) Si le terrain est plat, une photographie simplement redressée et mise à l'échelle par projection constitue une restitution de la planimétrie; b) Si le terrain est accidenté, cette même photographie n'est qu'une image qui ne pourra s'appeler restitution qu'après avoir été corrigée, par un procédé à déterminer 1) des déformations dues aux dénivellations; c) Nous remarquerons cependant que, toujours dans le cas de clichés considérés isolément, certaines solutions opèrent la restitution sans redressement préalable.

II. Remarques préalables intéressant le redressement.

Dans l'état actuel des choses, le redressement s'opère généralement par voie de projection optique; les conditions à remplir sont les suivantes: *image géométriquement correcte et optiquement nette*. Deux conceptions, dont il n'est pas inutile de parler afin d'en laisser apparaître les difficultés: Projection directe, projection indirecte.

a) *Projection directe*. On utilise un objectif unique (du même type que celui de la prise de vues de préférence). Le principe initial semble avoir été énoncé en premier lieu par Abbe: « À un plan de l'espace où se trouve l'objet correspond un plan de l'espace où se trouve l'image ». De plus, il aurait fait remarquer ensuite (et si l'on en croit la bibliographie allemande Sheimpflug en aurait le premier trouvé les applications pratiques) que, lorsque la correspondance projective est établie, *le plan objet, le plan principal de l'objectif et le plan image s'intersectent suivant une même droite*. Et, si l'on admet un objectif exempt de distorsion, il faut aussi que *l'équation dite des points conjugués soit satisfaite*, c'est-à-dire que l'on ait:

$$(p-f) (p'-f) = f^2$$

La condition de la droite d'intersection et celle des points conjugués sont nécessaires et suffisantes pour que la projection soit correcte et nette. A noter que dans certains appareils de redressement, des appareils (*inverseurs*) réalisent automatiquement ces conditions pour deux plans quelconques.

b) *Projection indirecte*. Ici la première condition disparaît; les plans sont parallèles; avec un objectif identique à celui de la prise de vue on reconstitue le faisceau inverse. Comme, dans ces conditions, la netteté sur l'écran de projection ne pourrait être réalisée qu'à très grande distance, il faut avoir recours à *un système optique additionnel*. Nous pensons qu'il est intéressant ici de formuler quelques réserves à ce sujet: 1. Non seulement l'objectif de projection mais aussi le système additionnel doivent être exempts de toute distorsion; 2. Le faisceau émergeant de la pupille de l'objectif de prise de vues étant limité, il faut que *la pupille d'incidence du système additionnel* soit aussi près

1) Voir plus loin: Problème connexe No 1) (Contribution à l'établissement de plans photographiques en terrain accidenté).

que possible de l'objectif pour que tout ce faisceau soit réfracté sans vignettisation; 3. Le coefficient d'agrandissement de l'image par rapport à l'objet (cliché) est fonction de la focale du système additionnel. *Nous attachant plus particulièrement à l'examen critique de ce dernier point*, nous ferons remarquer, — comme c'est d'ailleurs le cas dans l'appareil français à double projection Gallus-Ferber, — que seul un système optique à distance focale variable permet d'opérer la variation du coefficient d'agrandissement, et que, d'autre part, le champ de ces systèmes est restreint si l'on veut éliminer toute distorsion. Ce n'est que dans certains cas particuliers que l'on a pu jusqu'ici projeter l'ensemble d'un cliché *dans un plan* par la méthode indirecte; mais, par contre, il est relativement facile d'effectuer *une projection fractionnée* (bandes rectilignes par exemple) parce que, à ce moment, on peut se contenter d'un petit angle de champ, la distorsion imputable au système additionnel n'étant plus à craindre.

L'appareil dont il va être question, et dont un examen un peu plus détaillé s'impose, *puisque certains points* particuliers de cette thèse s'y rapportent, est basé sur la projection directe.

B — ESQUISSE D'ENSEMBLE DE LA METHODE ROUSSILHE

I. Examinons d'abord une solution géométrique susceptible de servir de base à la construction d'un appareil de restitution. Le plan de la figure 6 est le plan vertical passant par le centre p du cliché et par la ligne de plus grande pente de ce cliché. Celui-ci fait un angle i (inclinaison) avec le plan du terrain à l'échelle E . Le centre de perspective est en O , le pied de la verticale de l'avion est en N et son image (point nadiral) est en n ; l'axe optique passant par p (point principal) perce le terrain en P ; enfin, en d est représentée la droite d'intersection du plan du cliché et du plan contenant le terrain à l'échelle E , et en même temps l'image de cette droite.

Par définition, nous dirons que: restituer la figure contenue dans le plan π du cliché, c'est obtenir sur un plan quelconque une figure identique à celle du plan C .

Admettons, que ces plans existent et soit R d'un d'eux. Il fait un angle λ avec le plan P . Il passe forcément par d qui, comme nous venons de le voir est sa propre perspective et d'autre part, les longueurs dN et dP devant être conservées, on obtient par rabattement (au compas) les points n' (pied de verticale) et P' trace de l'axe optique, d'où par jonction respectivement avec n et p , deux droites se coupant en Σ nouveau centre de projection*.

Conclusion : comme il y a une infinité de plans tels que R , caractérisés par des angles tels que λ , *on peut dire aussi qu'il y a une infinité de solutions géométriques* du redressement dans lesquelles l'angle i disparaît, pour être remplacé par des angles α et α' que font respectivement le plan du cliché et le plan du terrain (écran de projection) avec

1) Il n'est pas question ici de développer la plupart des démonstrations dont nous ferons état et qui ne seraient que la transcription des travaux déjà publiés.

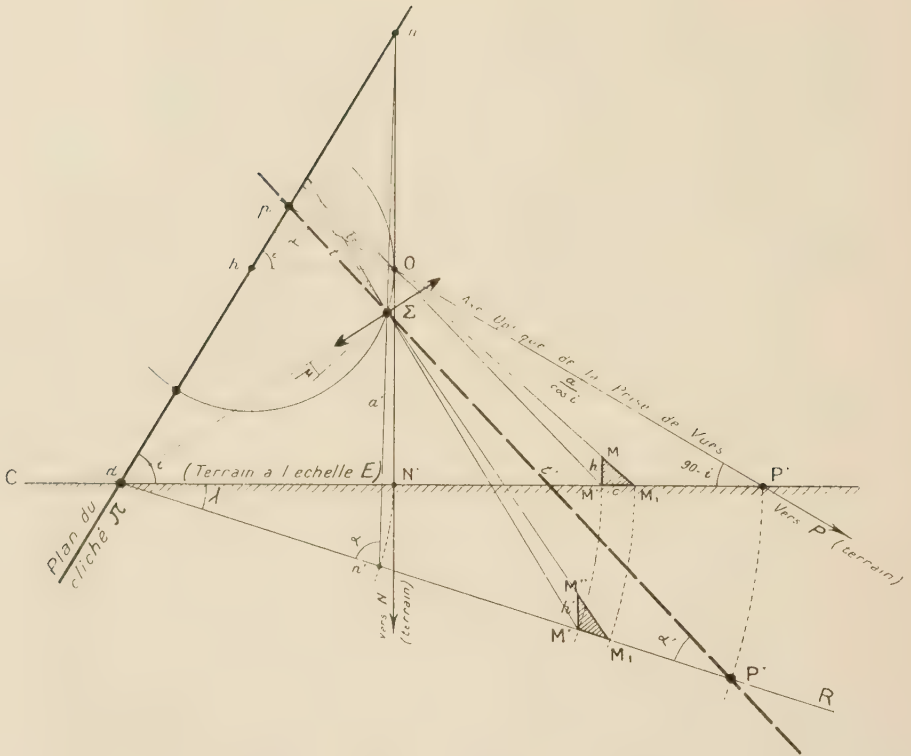


Fig. 6. Théorie du Redressement.

l'axe optique. Si donc, nous n'avions à faire intervenir que des phénomènes géométriques, le problème serait excessivement simple et nous n'aurions que l'embaras du choix. Mais on a intérêt à obtenir l'image redressée par voie photographique (c'est-à-dire par voie optique) et certaines conditions vont apparaître (celles énumérées précédemment) qui vont réduire à une ce nombre infini de solutions.

Ceci posé, supposons pour le moment connus les éléments de la prise de vues, et appelons :

f la focale de l'appareil de prise de vues,
 p le point principal du cliché,
 ϕ la focale de l'appareil de redressement,
 t_0 le tirage de l'appareil de redressement pour la position initiale (plan C),

t le tirage de l'appareil de redressement pour la position R de l'écran de projection,

t' la distance, mesurée sur l'axe optique, entre le centre optique et l'écran,

n le point nadiral (image du pied de la verticale),

α α' les angles (déjà définis) qui se substituent à i ,

μ l'angle que fait le plan principal de l'objectif avec l'axe optique
On a les relations suivantes:

$$t = \varphi \frac{a - t_0 \cos i}{a} \quad (1) \quad t' = \varphi \frac{a + t_0 \cos i}{a} \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \frac{t^2 - t_0^2}{2 t t_0} \cdot \operatorname{tg} i \quad (3) \quad \cos \alpha' = \frac{t^2 + t_0^2}{2 t t_0} \cdot \sin i \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{t^2 + t_0^2 - 2 \operatorname{tg} \varphi}{2 t t_0} \cdot \frac{\operatorname{tg} i}{\sin \alpha} \quad (5)$$

Si l'on connaît les éléments de la prise de vues et en particulier: A (altitude), i (inclinaison du cliché) et que l'on se donne l'échelle E, d'où a (altitude réduite), il est facile de calculer t_0 , car

$$-\frac{1}{t_0} + \frac{\cos i}{a} = \frac{1}{\varphi}$$

Alors la relation (1) donne t (position du centre optique), la formule (2) donne t' (position de l'écran), les formules (3) et (4) donnent les inclinaisons composantes du cliché et de l'écran, et la formule (5) donne l'inclinaison du plan principal de l'objectif.

Malheureusement, on ne connaît pas d'une façon suffisamment précise les éléments de la prise de vues. — Alors on remplace ces données initiales par la connaissance de 3 points de repère (plus un qui permettra d'éliminer les solutions étrangères). Avec un appareil de projection approprié, on établit la coïncidence de 3 points ABC du plan R avec leurs homologues a, b, c , du plan π (cliché) et on lit les quantités t, t', α, α' . Alors, l'inclinaison i du cliché dans l'espace est donnée par la relation:

$$\cos i = \frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha} \quad (6)$$

Si l'on dispose d'un objectif de restitution (focale φ) de même série que l'objectif de prise de vues (focale f) ,d'où $\varphi = f = f_0$ la distance séparant la trace P' de l'axe optique sur le sol du pied N' de la verticale résulte de:

$$P'N' = \frac{t' - f_0}{E} \sin i \quad (7)$$

et pour l'altitude de l'avion, on utilise:

$$A = \frac{t' - f_0}{E} \cos i \quad (8)$$

En définitive, on obtient: 1° un plan photographique du terrain à

$$c = \frac{h}{A} \times D \quad (9)$$

dans laquelle D représente la distance approximative entre le pied de la verticale de l'avion et le point considéré. La correction c (ou mieux la correction réduite mm') s'évalue par abaque, et elle s'effectue suivant le vecteur joignant l'image n du pied de la verticale au détail m considéré; c'est ainsi que sur la fig. 8, l'angle de bâtiment m se trouve reporté en m' qui est sa position planimétrique exacte. On remarquera que, si le plan de comparaison est à une altitude inférieure à tous les autres détails du plan, toutes les corrections sont dirigées vers n comme cela est mis en évidence sur la fig. 8.

On remarquera d'autre part, en se reportant à la formule (9) que pour une même courbe de niveau le facteur $\frac{h}{A}$ est une constante et que les quantités c (en l'occurrence m , m' , M_2 , M'_2 . . . etc) sont proportionnelles aux distances d_1 , d_2 , etc... d'où la possibilité de traiter en série ces corrections, plus rapidement et plus commodément. Ce qui nous amène tout naturellement à envisager la possibilité de traiter ainsi, non seulement une seule courbe de niveau qui n'a aucune épaisseur et ne représente par conséquent aucune surface, mais la zone comprise entre deux courbes de niveau consécutives (celle hachurée sur la figure 8 par exemple) en considérant tous les détails qui y sont contenus comme situés à une même altitude caractérisée par la cote moyenne des deux courbes en question (1).

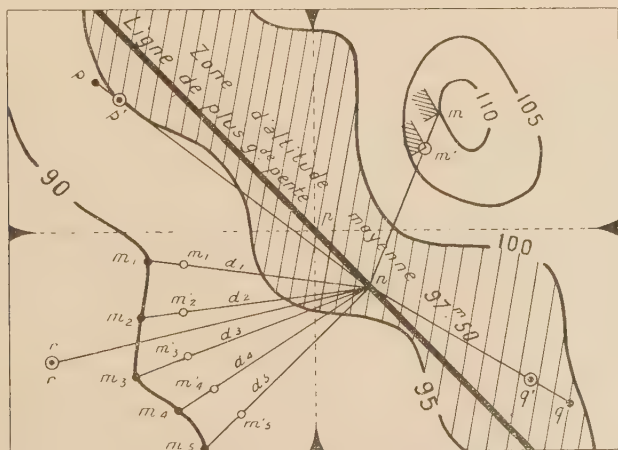


Fig. 8. Correction d'altitude en série par zones.

1) Cette cote moyenne est ici 97^m 5. L'avantage de cette conception est de pouvoir traiter le problème par voie de projection et photographiquement; mais certaines erreurs sont à craindre qu'il convient d'étudier. La question sera examinée un peu plus loin.

b) *Méthode préconisée.* La théorie de la méthode préconisée s'appuie sur les propriétés d'une photographie redressée. Nous avons vu qu'une telle photographie contient des éléments remarquables parmi lesquels la direction des lignes de plus grande pente du cliché initial et l'image du pied de la verticale de l'avion. Cette photographie redressée qui, comme nous venons de le voir, est une perspective conique du terrain ne saurait être assimilable à un plan qui, lui, est une perspective orthogonale. Nous allons voir ici comment, par projection optique et photographique, et en décomposant le terrain en zones d'altitude sensiblement constante, il est possible d'aboutir (dans des conditions de précision, de qualité et de rendement suffisantes) au résultat cherché. Nous ferons constater la nécessité de disposer à cet effet d'un nivellement, par courbes, du terrain considéré et nous montrerons, par une étude de temps passé et par un examen des écarts altimétriques, que le nivellement barométrique convient bien à cet effet. La solution du problème posé n'étant pas rigoureuse, nous la discuterons et fixerons certaines modalités d'exécution, propres à rendre les écarts constatés inférieurs aux tolérances que l'on s'est préalablement imposées.

II. Ceci posé, proposons-nous d'obtenir un cliché redressé dont l'échelle soit à peu près celle du cliché initial *. Nous ferons d'abord remarquer qu'au moment de l'établissement du plan de vol, on se donne le rapport K qui doit exister approximativement entre l'échelle des clichés et l'échelle du plan à obtenir (cette dernière étant généralement plus grande, c'est-à-dire avec un coefficient d'agrandissement K compris entre 1,5 et 3,5). Alors, en se référant à la formule :

$$\cos \alpha' = \frac{K^2 + (K + \cos i)^2}{2K (K + \cos i)} \cdot \sin i$$

qui donne α' en fonction de K et de i, on voit qu'il est très simple, après avoir mis le cliché et l'écran en correspondance projective, de rapprocher l'écran de l'objectif en faisant varier t et t' de cette sorte: 1° que la netteté soit conservée au centre de l'écran; 2° que K devienne voisin de 1. Comme i est constant (c'est l'inclinaison du cliché dans l'espace), comme K est sensiblement égal à 1, on tire α' de la relation précédente et on fait marquer cette quantité au porte-écran. La relation :

$$\cos i = \frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha} \text{ permet alors de tirer } \alpha.$$

Enfin la relation

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{\sin i \cdot \cos i}{2K (K + \cos i) \sin \alpha} \text{ donne } \mu \text{ (décentrement).}$$

On fait marquer, puis on place convenablement sur le porte-écran

2) C'est-à-dire dont l'image soit contenue dans une plaque du même format (18 x 24 par exemple).

une plaque sensible de même format que le cliché initial et, par impression, on obtient un positif redressé que l'on inverse ou transforme en négatif par contre-typage.

III. La question du nivellement. Il est toujours possible de tirer un nivellement par courbes de niveau de deux clichés consécutifs comportant l'image d'une zone commune, à condition de connaître les éléments caractéristiques fixant la position du cliché dans l'espace (éléments donnés d'ailleurs par le redressement) et qui sont: Position planimétrique de la verticale qui passe par l'avion (2 conditions), altitude A (une condition); distance focale f (une condition), angle d'inclinaison i (une condition), direction des horizontales du cliché (une condition). La détermination du relief s'opère point par point; elle est longue et onéreuse, et, pour cette raison, nous n'avons pu en envisager l'application.

Nous avons pensé, toujours en partant de deux clichés consécutifs comportant l'image d'une zone commune, appliquer la conception Barr et Stroud *, qui, comme on le sait, associe à l'image de chaque cliché l'image d'une « grille » hypothétique, qui aurait matérialisé au sol un ou plusieurs plans horizontaux, *d'altitude déterminée*. Constatons ici que la possibilité de travailler sur des clichés redressés mathématiquement ** et mis rigoureusement à la même échelle, est de nature à améliorer considérablement les résultats obtenus en Angleterre.

Pour le moment, nous avons adopté le nivellement barométrique, par utilisation du *baromètre altimétrique* du Colonel Goulier compensé construit par les Etablissements Jules Richard. L'erreur moyenne quadratique instrumentale a été évaluée en terrain accidenté à St-Cloud. Voici d'ailleurs les résultats des observations: (*Voir tableau page 28*)

— L'erreur moyenne quadratique instrumentale a été évaluée à $\pm 0^m 8$. Admettons, en gros $+ 1^m 00$. La courbe de Gauss, dans ces conditions, indique une probabilité de 0.3 pour commettre une erreur plus grande que 1.00 et une probabilité de 0.08 pour commettre une erreur plus grande que $2^m 00$ en valeur absolue. *La précision est suffisante*, à condition: 1° de manier l'instrument avec beaucoup de soin; 2° de tenir compte de la température; 3° d'avoir la possibilité (ce qui était le cas à St-Cloud et ce qui est généralement le cas en France) de stationner de temps en temps (toutes les heures par exemple) un repère N.G.F. ou un point fixe d'altitude connue, ceci pour le tenir compte des variations de pression... Ainsi on détermine sur le terrain, un nombre suffisant de points pour en fixer les lignes caractéristiques; ces points sont généralement des détails apparents des photographies. Le reste: c'est de la topographie classique.

IV. La restitution photographique par zones. Résumons certains points essentiels de ce qui a été exposé jusqu'à présent: 1° Le cliché

1) Angleterre (The Barr and Stroud topographical stereoscopes — Pamphlet N° 451. Anniesland. Glasgow W 3 Scotland).

2) Comme cela sera exposé d'ailleurs plus loin.

Evaluation de l'erreur moyenne altimétrique au baromètre Goulier (n° 1)

Cote exacte	Cote au baromètre altimétrique	Cote du barom corrigée de l'é- cart systéma- tique	E en dm	E ₂	A St-Cloud Rue
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
81,80	80	80,6	—12	144	du Mt Valérien
92,36	93	93,6	+12	144	du
89,81	89	88,6	—12	144	Perrier
74,01	75	75,6	+ 3	256	Gare
59,80	59	59,6	+16	9	Rond Point de Longchamp
47,83	48	48,6	+ 8	64	Avenue de
31,27	31	31,6	+ 3	9	Long-
29,55	29	29,6	+ 1	1	Champ
40,64	62	62,6	—14	100	Bd Senard
64,04	41	41,6	+10	196	Dailly
73,57	73	73,6	0	0	
95,84	95	95,6	— 2	4	»
98,73	99	99,6	+ 9	81	Gounod
99,85	100	100,6	+ 8	64	»
99,15	98	98,6	— 5	25	»
99,40	99	99,6	+ 2	4	Pasteur
101,30	101	101,6	+ 3	9	»
100,70	99	99,6	—11	121	»
103,76	103	103,6	— 1	1	de
107,55	108	108,6	+11	121	
104,07	103	103,6	— 5	25	Garches
109,35	109	109,6	+ 3	9	Bould
113,80	112	112,6	—14	144	de
117,	115	115,6	—12	196	Versailles
127,95	127	127,6	— 3	9	
132,37	132	132,6	+ 3	9	du Maréchal
134,55	133	133,6	— 9	81	Foch
129,50	129	129,6	+ 1	1	de la P-te Jaune
134,17	134	134,6	+ 4	16	»
127,65	128	128,6	+10	100	Tahère
121,55	121	121,6	+ 1	1	»
123,42	122	122,6	— 8	64	»

3066,

3047

2152

Erreur moyenne quadratique : $\pm 8^m/m$. 8.

Evaluation de l'erreur moyenne quadratique au barographe alti-
métrique Goulier (St-Cloud, Janvier 1936).

initial C, dont l'échelle est E^* , est transformable en un cliché CR (négatif lui aussi) redressé; 2° Sur ce cliché CR est matérialisé, soit par l'image d'un détail planimétrique, soit par un trou finement piqué, la position du point de vue que nous désignerons par N; 3° C'est de ce point N que partent les vecteurs suivant lesquels s'effectuent les corrections d'altitude.

a) Ceci posé voyons comment il est possible d'opérer photographiquement la restitution par zones. Reprenons la fig. 13 et considérons-la comme constituée schématiquement par un système de projection comprenant: source lumineuse en O, cliché redressé en CR, écran en R. En somme on reconstitue l'espace à l'échelle du plan et on a la possibilité, en rendant mobile l'écran de projection, c'est-à-dire en lui faisant subir une translation h (position matérialisée par une parallèle à R passant par M) de telle sorte que N (image du pied de la verticale) se déplace suivant NO, de restituer directement et correctement un point tel que M dont la position eût été M_1 si l'écran avait été maintenu dans la position R. Ainsi se trouvent restitués automatiquement tous les points M de même altitude h ; et, si nous donnons à l'écran des positions très rapprochées l'une de l'autre et correspondant à toutes les altitudes du plan, la restitution en question est générale.

On comprend la complexité du problème si l'on veut le traiter d'une façon intégrale. Pratiquement, on décompose le terrain en zones limitées par des courbes de niveau et traitées comme si chaque zone était plate et située à une altitude représentant la moyenne des altitudes des 2 courbes consécutives qui la limitent (fig. 9).

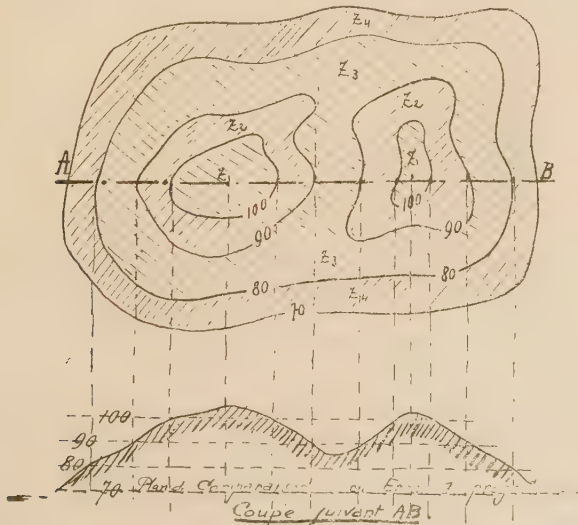


Fig. 9.

1) On plus exactement $\frac{1}{E}$ que nous désignons plus commodément par le dénominateur E.

Dans le cas qui nous occupe, les zones sont Z_1 , Z_2 , Z_3 et Z_4 et d'altitudes moyennes respectivement égales à 102,5 *, 95, 85, 75. La restitution est donc correcte pour la partie médiane de chaque zone. Une erreur est commise qui grandit au fur et à mesure qu'on se rapproche de la courbe limite, pour y devenir maximum. Donc, une étude et une discussion s'imposent, liées d'ailleurs à la focale de l'appareil de prise de vues, à la partie utilisable de chaque cliché et à l'organisation générale du travail. En somme, le problème de la restitution planimétrique en terrain accidenté se trouve transformé (figure 10). Le terrain naturel V se trouve transformé en un terrain aplati V' , horizontal dans ses grandes lignes, mais présentant des « dents de scie » qu'il convient de rendre négligeables. Pour le moment, il importe de se demander comment le schéma de la fig. 8 s'applique à l'appareil redresseur français déjà existant (celui de Monsieur Roussilhe).

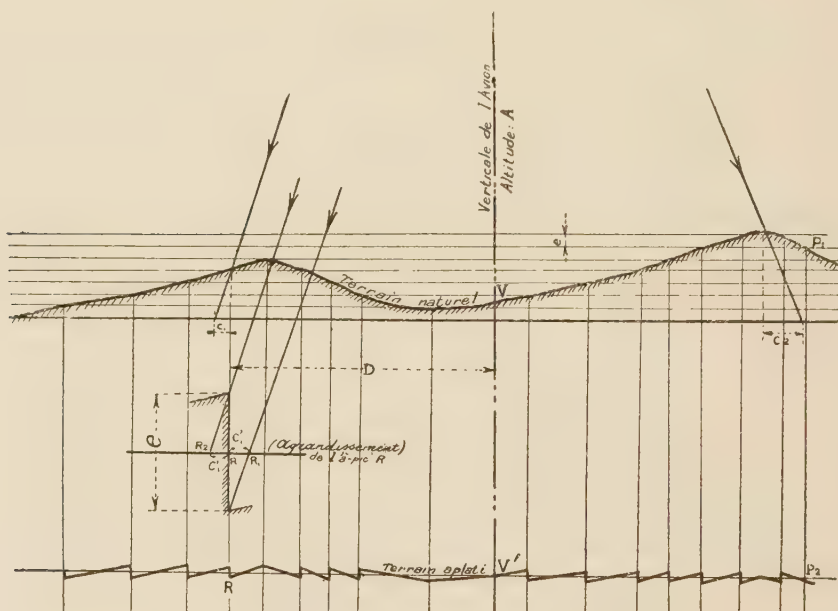


Fig. 10. Aplatissement du terrain naturel.

Nous avons vu comment le cliché initial C était transformé en un cliché redressé CR. Considérons sur ce cliché une droite ab image d'une droite AB (connue sur le terrain par les coordonnées de ses deux extrémités) et située dans le plan de comparaison. Il est possible de mesurer ab avec une grande précision (le 1/100 de mm par exemple) sur le cliché; soit l sa longueur. Sur l'écran de projection, sa longueur L s'obtient facilement par le calcul.

1) Et non 105, car le sommet n'est pas à la cote 110,

La quantité:

$$K = \frac{L}{1} = \frac{L_1}{l_1} = \frac{L_2}{l_2} *$$

portera le nom de *coefficient d'agrandissement du cliché redressé par rapport au plan de comparaison* (plan d'altitude zéro).

Si la droite dont l'image est *ab* s'était trouvée dans un plan de comparaison d'altitude *h'*, sa longueur eût été: $A'B' = L'$

$$\text{avec } \frac{A'B'}{AB} = \frac{A'}{A} = \frac{A-h}{A}, \text{ d'où } L' = L \cdot \frac{A-h}{A}$$

Soit K' le coefficient d'agrandissement permettant de passer de *ab* à $A'B'$,

$$K' = \frac{A'B'}{ab} = \frac{L'}{1} = \frac{L}{1} \cdot \frac{A-h'}{A} = K \frac{A-h'}{A}$$

L'altitude *A* de l'avion est constante, le coefficient K' est donc lié au coefficient initial K et à la dénivellation *h'* que l'on n'a qu'à faire varier. Le calcul est donc simple pour toutes les positions de l'écran.

Ceci posé, rappelons-nous ce qui a été dit au sujet du redressement. Pour opérer la restitution, on établit le parallélisme entre les 3 plans (cliché, objectif, écran) c'est-à-dire que l'on fait marquer $\alpha = 90$, $\mu = 0$, $\alpha' = 90$. De plus, l'axe optique doit passer par l'image du pied de la verticale.

Soit alors φ la focale de l'objectif utilisé. Partant d'une certaine valeur K du coefficient liant l'échelle du cliché à celle de l'écran, proposons-nous d'évaluer les valeurs *t* et *t'* à faire marquer à l'appareil.

$$\text{D'abord } \frac{t'}{t} = K \quad \text{d'où } t' = Kt$$

$$\text{De plus, d'après l'équation de plans conjugués } \frac{1}{t} + \frac{1}{Kt} = \frac{1}{\varphi}$$

$$\text{D'où } t = \frac{K\varphi + \varphi}{K}$$

$$\text{Et ensuite } t' = K\varphi + \varphi$$

Le mode opératoire est alors le suivant : 1. Placer le cliché redressé dans le porte-cliché de telle sorte que l'image du pied de la verticale

1) $\frac{L_1}{l_1}$, $\frac{L_2}{l_2}$, $\frac{L_n}{l_n}$ résultant de mesures analogues à $\frac{L}{1}$ (pour contrôle)

(matérialisée par un trou très fin) coïncide avec le centre optique. — 2. Projeter sur l'écran de projection en faisant $\alpha = 90^\circ$ $\mu = 0$ $\alpha' = 90^\circ$, puis t et t' déduits des formules précédentes. — 3. Etablir la correspondance projective. — 4. Placer un papier sensible ou une glace sensibilisée sur le porte-écran. — 5. Restituer par zones.

V. *Erreurs planimétriques commises.* Nous avons vu qu'au centre de chaque zone l'erreur planimétrique était nulle et qu'elle devenait maximum le long de chaque courbe qui la limite. Soit $2dh$ l'équidistance des courbes. L'erreur commise correspond à une dénivellation de la moitié, c'est-à-dire dh . Nous avons vu :

$$c = h. \frac{D}{A} \quad \text{d'où} \quad dc = dh \frac{D}{A}$$

La quantité dc est généralement imposée par les conditions techniques d'exécution du travail; elle est égale à la tolérance graphique multipliée par l'échelle du plan. La quantité A est une constante pour une focale déterminée ainsi que dh . Donc dc est fonction de D , distance du pied de la verticale au point considéré dont la valeur déduite de la relation précédente devra être au maximum :

$$D = \frac{dc}{dh} \cdot A$$

Appliquons au cas concret : $dc = 0^m/^{m} 3 \times 2500 = 0^m 75$, $A = 3380^m$ (la focale utilisée étant de $0^m 50$), $dh = 5^m. 00$ (équidistance des courbes de 10^m en 10^m) ; il vient :

$$D = \frac{0.75}{5.00} \times 33.80 = 507 \text{ mètres.}$$

Ce qui signifie que, dans un cercle de 507 mètres de rayon autour du pied de la verticale du point de vue, l'erreur systématique variable imputable au procédé préconisé, est encore tolérable. — Si maintenant on augmente la longueur focale f de l'appareil de prises de vues, A augmente et D augmente dans la même proportion. Mais il y a un inconvénient : celui résidant dans la difficulté de travailler aux hautes altitudes (avions plus coûteux, respiration artificielle... etc.). On peut aussi diminuer l'équidistance des courbes car alors dh diminue et D augmente dans la même proportion; là aussi il y a un inconvénient : c'est que le nombre de zones à restituer augmente considérablement.

Il faut savoir trouver la juste mesure. Il faut concilier les quantités $2 dh$, f (done A), et D pour obtenir dans les meilleures conditions possibles une précision suffisante.

D. DE QUELQUES CONCEPTIONS DU PROBLEME DE LA CARTE DANS L'ESPACE.

Le problème du redressement, considéré dans sa forme la plus simple, se ramène au problème classique de la carte dans l'espace dont voici l'énoncé :

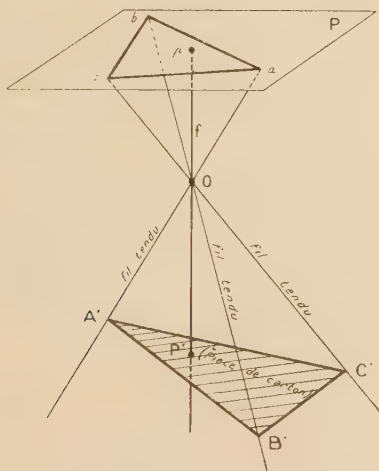


Fig. 11. Redressement par le trièdre.

Connaissant 3 points du cliché a, b, c et les longueurs à l'échelle E des cotés du triangle homologue ABC , placer les sommets de ce triangle sur les arrêts du trièdre $Oabc$.

Vu l'intérêt de la question, et surtout pour montrer qu'en matière de photogrammétrie appliquée les diverses solutions publiées ne sont pas susceptibles de donner satisfaction, nous allons en analyser quelques unes (voir fig. 11).

I. — *Solution grossière.* — 1°. Fixer le cliché dans l'espace après avoir percé 3 trous très fins en a, b , et c , puis déterminer le point O (grâce à la connaissance du point principal p du cliché et de la longueur focale de l'appareil de prises de vues; 2°. Matérialiser la trièdre complet $Oabc$ par 3 fils tendus ! 3°. Insérer par tâtonnements dans ce trièdre une pièce de carton $A'B'C'$, réduction à l'échelle E du triangle ABC au sol; 4°. Avec une nivelle, déplacer l'ensemble dans l'espace de façon à rendre horizontal le plan $A'B'C'$; 5°. Avec ce même instrument, déterminer la direction des horizontales du cliché, les gisements (Θ) d'une ou plusieurs directions, l'angle i des lignes de plus grande pente.

Evidemment, cette solution est peu pratique, difficile à réaliser, peu précise et en ce qui nous concerne elle ne peut être d'aucune utilité.

II. — *Epure de géométrie descriptive.* — Sous cette forme le problème a été traité par plusieurs auteurs français ou étrangers. LAUSSEDA

signale le processus à suivre pour constituer une telle épure. Monsieur d'OCAGNE, dans son cours de géométrie en donne une variante où les approximations successives jouent le principal rôle. Enfin Monsieur ROTSILHE, dans son ouvrage sur la photographie aérienne appliquée aux levés topographiques à grande échelle a traité le problème sous une forme un peu différente. *En voici une autre solution :*

Considérons la figure 11. Le trièdre donné est défini par le cliché et le centre optique O. Nous allons opérer par la géométrie descriptive exactement comme nous l'avons fait tout à l'heure avec une pièce de carton : nous allons poser A' et B' sur les arêtes du trièdre correspondants et faire pivoter le triangle A'B'C' autour de A'B' pour voir si C' coïncide avec la troisième arête. Nous n'y parviendrons pas du premier coup; nous constaterons des écarts. Alors nous essayerons d'établir une loi de ces écarts qui nous permettra d'aboutir graphiquement à la solution définitive.

Considérons maintenant l'épure de la figure 12. *Le plan de projection* est la face OA'B'. Le problème est supposé résolu et la solution est OA'B'C'. Si nous rabattons le triangle A'B'C' dans le plan de projection C' vient en C₀ et le triangle A'B'C₀ représente en vraie grandeur le triangle donné.

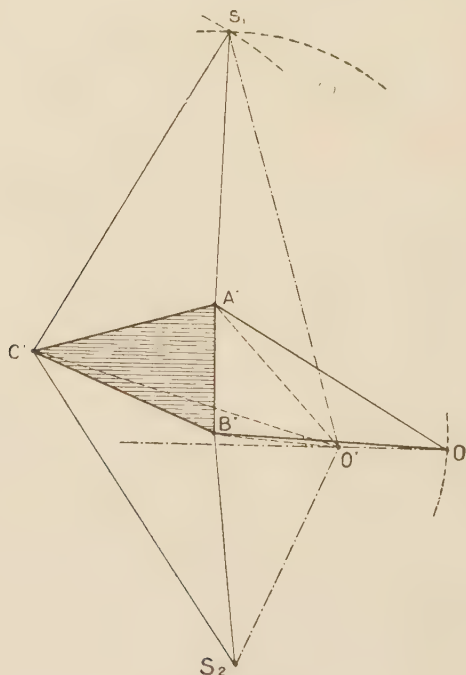


Fig. 12.

Evaluons la cote du point C'. — Par rabattement du plan vertical passant par C₀C'φ, cette cote est C'I. Par rabattement du plan vertical

Recherchons maintenant la position du point de vue. Nous nous placerons dans le cas le plus simple : celui où les points de redressement ont été choisis dans un même plan horizontal... Considérons la figure 13. Prenons cette fois comme plan de projection le plan A'B'C'. Rabattons sur ce plan les 3 faces du trièdre, chose facile puisque nous en connaissons, d'après l'épure 12, les 3 arêtes qui donnent par intersection O, S₁ et S₂. Reconstituons le trièdre. Dans ce mouvement, O décrit la droite OO', S₂ décrit S₂O' et S₁ décrit S₁O'. Ces 3 lieux se rencontrent en O', position du point de vue dont nous pouvons relever les coordonnées, à l'échelle E d'abord et ensuite en vraie grandeur. Quant à la cote, on l'en déduit immédiatement par une simple résolution de triangle rectangle.

III. — Méthode des lieux géométriques *).

Les coordonnées approchées du point O nous sont données soit par un redressement préalable, soit par la résolution de l'un des problèmes esquissés précédemment. Considérons la figure 14. en A' et B' deux points au sol dont les coordonnées sont connues; en O la position exacte mais inconnue du point de vue. Soit α l'angle sous lequel a été vu (par l'appareil photographique) le segment A'B'; soit α' l'angle sous lequel ce même segment serait vu du point approché; appelons α la quantité ($\alpha - \alpha'$).

On sait que le lieu des points de l'espace d'où l'on voit un segment A'B' sous un angle α' est un *tore*. Dans certaines limites ce tore peut être assimilable à un plan qui intersecte la face OA'B' suivant une droite ab facile à définir, et perpendiculaire à cette face.

Définissons d'abord la droite ab. Soient DA et DB les distances (approximatives) séparant la station des points A' et B'; soient α_0 et θ_0 les coordonnées de la station O dont l'altitude est A₀; soient Xa, Ya, Za les coordonnées du point a. On a pour ces coordonnées :

$$Xa - \alpha_0 = (XA' - \alpha_0) \frac{DB}{DA} \cdot \frac{d\alpha \cdot \sin 1''}{\sin \alpha}$$

$$Ya - \theta_0 = (YA' - \theta_0) \frac{DB}{DA} \cdot \frac{d\alpha \cdot \sin 1''}{\sin \alpha}$$

$$Za - A_0 = - A_0 \cdot \frac{DB}{DA} \cdot \frac{d\alpha \cdot \sin 1''}{\sin \alpha}$$

On obtiendrait de la même façon Xb, Yb et Zb.

Et maintenant définissons l'équation du plan π , passant par ab et normal à la face connue OA'B' du trièdre. L'équation de cette face est :

1) Analyse d'une note paru sous la signature de Monsieur «Roussigne»: Sur la résolution de problème de Pothenot dans l'espace Imp. Robaudy Cannes 1929. Il nous a paru opportun d'analyser ici cette intéressante conception.

Considérons maintenant un plan d'altitude $A' = A_0 + dA'$. Soient a' et b' les coordonnées des points d'intersection des 2 droites précédemment définies avec ce plan.

On a pour les coordonnées de a' :

$$\begin{aligned}
 Xa' - \alpha_0 &= \left[XA' - \alpha_0 + \right. \\
 &+ \frac{A_0^2 \cdot \sin \vartheta A'B'}{VoA' \cdot \sin (\vartheta A'B' - \Theta v_0 A')} \left. \right] \frac{DB \cdot \sin l''}{DA \cdot \sin \alpha} + \\
 &+ \frac{A_0 \cdot \sin \vartheta A'B'}{VoA' \cdot \sin (\vartheta A'B' - \vartheta v_0 A')} \cdot dA' \\
 Ya' - \beta_0 &= \left[YA' - \beta_0 - \frac{A_0^2 \cdot \cos \vartheta A'B'}{VoA' \cdot \sin (\vartheta A'B' - \vartheta v_0 A')} \right] \frac{DB \cdot \sin l''}{DA \cdot \sin \alpha} - \\
 &- \frac{A_0 \cdot \cos \vartheta A'B'}{VoA' \sin (\vartheta A'B' - \vartheta v_0 A')} \cdot dA'
 \end{aligned}$$

Pour une deuxième altitude $A'' = A_0 + dA''$, on obtient des coordonnées Xa'' et Ya'' qui ne diffèrent des précédentes que par les derniers termes dont les coefficients n'ont pas varié. *Autrement dit, en superposant les plans A' et A'' , les graphiques de droites $a'b'$ et $a''b''$ sont homothétiques par rapport au point vrai.* On est donc amené à joindre les points homologues des deux graphiques et à déterminer leur point moyen. Le point O étant adopté, le rapport moyen d'homothétie des deux graphiques donne l'altitude vraie.

1890

Le point principal (fig. 15) représente le pied de la perpendiculaire abaissée du centre optique de l'objectif sur le plan de l'émulsion et dans une chambre photogrammétrique il est matérialisé par quatre repères précis dont l'image est fixée sur la plaque en même temps que l'image du sol. Notons que les angles mesurés au point principal sont *géométriquement exacts* (1) si l'axe optique a pu être mis parfaitement vertical au moment de la prise de vues, et que *les dénivellations sont sans influence sur cette mesure*. Pour des petites inclinaisons de l'axe optique et dans le cas de dénivellations insignifiantes, le point principal conserve à peu près les propriétés ci-dessus énoncées.



Fig. 15.

1) Ils soumis alors à l'influence de quelques erreurs parmi lesquelles : *distorsion de l'objectif* (que l'on peut rendre négligeable par le choix d'une optique appropriée) *grain de la plaque* (erreur à caractère accidentel), *erreur propre au mesurage* (accidentelle).

Le point nadiral n est, sur le cliché, l'image du point du terrain représentant le pied N de la verticale passant par l'objectif au moment de la prise de vues. Si l'axe optique fait un angle μ avec la verticale du point de vue, n se détache de p suivant une droite du cliché que nous avons déjà appelée *ligne de plus grande pente*; l'angle μ est la *distance nadirale*.

Les droites perpendiculaires à la ligne de plus grande pente sont les horizontales du cliché. Le gisement φ d'une direction mesurée sur le cliché pourra être évalué par rapport à la direction de ces horizontales prise comme origine. On a peu d'intérêt à utiliser les angles mesurés au point nadiral. Toutefois certains auteurs (1) préconisent de prendre les directions brutes mesurées au point principal à partir de px (direction des horizontales) et de leur appliquer une correction de la forme:

$$\Delta\varphi = \varphi \sin^2 \frac{\mu}{2} \cdot \sin. 2\varphi + \dots \text{négl.},$$

dans laquelle, μ = distance nadirale, φ = gisement sur le cliché de la direction considérée.

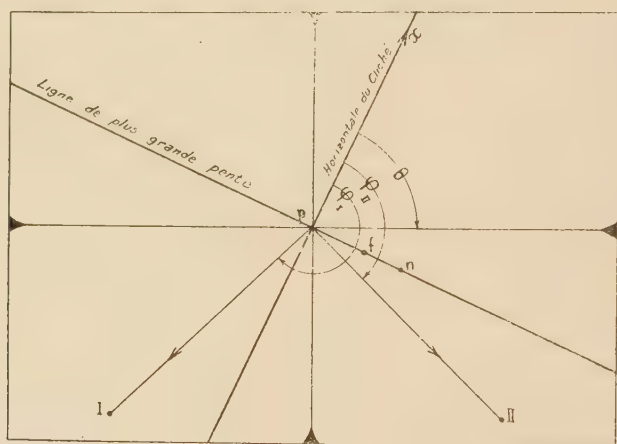


Fig. 16.

Le point focal est défini par l'intersection de la bissectrice de l'angle NOP ou de nOp (opposés par le sommet) et du plan du cliché. Il est situé en f sur la ligne de plus grande pente (voir figure 16) et pour de petites inclinaisons du cliché, on peut admettre qu'il se situe au milieu de la distance pn . Son utilisation, dans certains cas, peut éviter un redressement préalable et en ce sens son intérêt est à souligner.

1) (Buchholtz). Über einige Probleme die Radial triangulation. Détermination de la distance nadirale. Riga 1932, p. 284 et suivantes.

B. GENERALITES SUR LE PRINCIPE PRECONISE

Nous avons vu précédemment que pour effectuer un redressement par le calcul, la solution qui se présente immédiatement à l'esprit est celle qui s'applique au problème de la carte dans l'espace. Dans le cas où l'on connaît 3 points A.B.C. au sol, points définissant 3 segments AB, BC et CA, vus de la station photographique sous des angles γ , α et β (3), on peut considérer le point de vue comme situé dans l'espace à l'intersection de 3 lieux géométriques définissant chacun les points d'où chaque segment est vu sous un angle constant. Ces lieux sont des tores. On peut constater la simplicité du problème dans le plan par application de la *méthode d'un point approché*, aux environs de ce point chaque lieu étant tracé et étant confondu avec une droite (la tangente au segment capable). Ici les lieux deviennent des plans tangents aux tores et la question est plus compliquée. *Nous pensons que cette méthode présente peu d'intérêt pratique parce que trop longue, trop sujette à erreurs ou fautes et pas beaucoup plus précise que celle appliquée dans l'appareil de redressement.*

Appelé par nos fonctions à diriger la partie technique d'une entreprise de photogrammétrie spécialisée dans les applications du « Redressement » (4), il nous est apparu du plus haut intérêt de rechercher les moyens de redresser nos clichés aériens avec des prix de revient bien inférieurs à ceux constatés jusqu'alors. L'appareil redresseur Roussilhe vaut environ 60.000 Frs et il permet, en terrain plat ou sensiblement plat, d'opérer le redressement de 1 cliché à l'heure, soit 3/4 d'heure environ pour la recherche des caractéristiques du cliché (direction de la ligne de plus grande pente, μ , α , α' i, position du pied de la verticale de l'avion, altitude A), et 1/4 d'heure pour le tirage et le développement de l'épreuve. Nous nous sommes proposé de libérer l'appareil redresseur pendant la durée de la première opération.

Nos recherches nous ont amené à choisir entre trois solutions:

a) Etude des déformations simultanées des angles des côtés et des diagonales d'un quadrilatère du cliché par comparaison avec ces mêmes éléments mesurés au sol; b) Etude des déformations angulaires (angles mesurés au point principal) par comparaison avec les angles homologues déduits de mesures au sol; c) Etude des déformations linéaires de segments de droites issues du point principal du cliché.

La solution (a) nous a conduit à des calculs compliqués et à des résultats peu encourageants; nous l'avons abandonnée bien qu'elle présentât sur les deux autres l'avantage de dispenser les opérateurs topographes d'évaluer les coordonnées du point au sol ayant pour image le point principal du cliché. Dans la solution (b), nous n'avons pas tardé à constater que les déformations angulaires n'étaient pas assez sensibles pour nous permettre d'évaluer i et ϑ avec une précision suffisante. Par

3) A évaluer en fonction de la position sur le cliché de a, b, c (homologues de A, B, et C) et des caractéristiques de l'appareil de prises de vues.

4) Société Générale de Photo-Topographie, 26 Boulevard Voltaire - Paris.

contre, la solution (c) s'étant révélée rapide, simple et concluante au point de vue de la valeur des résultats a été adoptée.

C. ETUDE GEOMETRIQUE

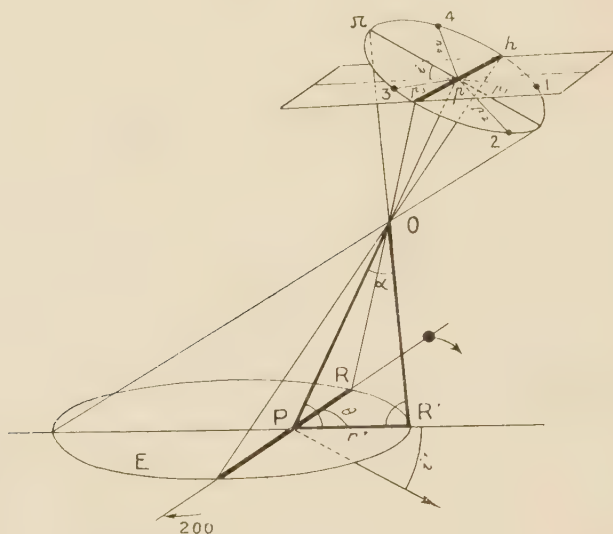


Fig. 17.

Nous avons donc posé le problème comme suit: *Comment se déforme un segment de droite, issu du point principal du cliché, suivant son gisement dans son plan par rapport à la direction des horizontales et suivant l'inclinaison de ce cliché?*

On sait qu'au moment de la prise de vues, le cliché a une position absolument quelconque dans l'espace (position cependant très voisine de sa position horizontale). Admettons pour le moment que le terrain photographié est plan et ne présente pas de dénivellations. Considérons un cercle du cliché ayant pour centre le point principal. La projection de ce cercle sur le terrain est une ellipse. La longueur de ses rayons varie. C'est cette variation qu'il nous faut étudier. Considérons la figure 17.

En π est représenté le cliché par un cercle de centre p (point principal). Sur ce cercle sont situés quatre points de redressement 1, 2, 3, 4. La ligne de plus grande pente est $p\pi$ est elle est contenue dans le plan de la figure. L'inclinaison est i . Nous l'avons déjà dit: le terrain est plat. La projection de p sur le sol est P . La trace de l'horizontale ph est PR . La trace du cliché cercle est l'ellipse E .

Etudions les variations de $PR = r$. Soit R' une position courante de R sur l'ellipse (pour la différentier de la position initiale R); soit

Et comme c'est généralement le cas en photographie aérienne, si l'on fait en sorte de placer l'axe optique de prise de vue aussi près que possible de la verticale, (il étant ainsi toujours inférieur à 3 grades en valeur absolue) on peut assimiler les tangentes aux arcs et écrire

$$i' = i \cdot \sin \vartheta.$$

Cette relation se vérifie de suite pour des valeurs de ϑ égales respectivement à 0, 100 et 200 grades. Pour les extrêmes, i' est nul et sa valeur maximum est atteinte par $\vartheta = 100$ grades.

b) *Considérons maintenant le triangle OPR'*

on a d'abord $\widehat{OPR'} = 100 - i'$

$$\begin{aligned} \text{Et } \widehat{OR'P} &= 200 - [\alpha + (100 - i')] \\ &= 100 - (\alpha - i'). \end{aligned}$$

La quantité α est facile à évaluer en fonction du rayon du cercle considéré sur le cliché et de la focale de l'appareil de prise de vues. Quant à i' nous venons de le définir.

Il vient finalement: $\widehat{OR'P} = 100 - (\alpha - i \sin \vartheta)$.

Appliquons maintenant la relation des sinus au triangle

$$\text{OPR'}, \quad \frac{PR'}{\sin \alpha} = \frac{OP}{\sin 100 - (\alpha - \sin \vartheta)}.$$

D'autre part, dans le triangle OPR

$$\frac{PR}{\sin \alpha} = \frac{OP}{\sin (100 - \alpha)}$$

$$\text{Et en rapprochant ces deux égalités: } \frac{PR'}{PR} = \frac{\cos \alpha}{\cos (\alpha - \sin \vartheta)}.$$

Et la variation de ce rapport nous montre, que PR diminue pour passer par un minimum lorsque $\vartheta = 100$ G, reprend sa valeur initiale lorsque $\vartheta = 200$ G, augmente, passe par un maximum pour $\vartheta = 300$ G et revient enfin à sa valeur primitive.

Tout le procédé de redressement préconisé ici tient en cette constatation.

D. TRADUISONS CECI PAR UN ABAQUE CARTESIEN

Pour simplifier la question, mettons la relation sous la forme

$$\log \frac{PR'}{PR} = \log \cos \alpha - \log \cos (\alpha - i \sin \vartheta), \text{ relation de la forme}$$

f 1. 2. 3 = 0, donnant lieu comme on le sait à une famille de courbes.

1°. Construisons une de ces courbes pour une valeur particulière de i. Soit i_1 cette valeur.

C'est alors une relation à 2 variables qu'il convient de représenter

$$\log \frac{PR'}{PR} = \log \cos \alpha - \log \cos (\alpha - i_1 \sin \vartheta)$$

Et si nous faisons

$$A = \log \cos \alpha,$$

$$B = \alpha,$$

$$C = i_1,$$

$$r = \frac{PR'}{PR}.$$

Il vient:

$$\log r = A - \log \cos (B - C \sin \vartheta) \quad (1)$$

La représentation nomographique de cette relation par un système de droites eût été souhaitable; elle n'est malheureusement pas possible

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Posons alors } x = \mu_1 \vartheta & \text{d'où } \vartheta = \frac{x}{\mu_1} \\ y = \mu_2 \log r & \text{d'où } \log r = \frac{y}{\mu_2} \end{array} \right\} (11)$$

la relation (1) devient :

$$\frac{y}{\mu_2} = A - \log \cos (B - C \sin \frac{x}{\mu_1}) = A - \log \cos S$$

Donnons alors à x des valeurs échelonnées, valeurs correspondant par exemple à une variation de ϑ comprises entre 0 et 400, avec 25 comme échelon, et par points construisons la courbe. Graduons les axes suivant les relations (II). Cotons enfin cette courbe de la valeur i adoptée pour la construire.

$$i = 1 \text{ cr.}$$

$$\alpha = 12 \text{ cr.} 50$$

1	2	3	4	5	6	7	8
Θ	$\frac{x}{m/m}$	$\frac{x}{\sin \mu_1}$	$\frac{x}{c \sin \mu_1}$ pour $c = 1 \text{ cr}$	S	$\log. \cos S$	$\frac{y}{\mu_2} =$ $A - \log \cos S$ $A = 1,99157$	$\frac{y}{m/m}$
0	0	+ 0,00000	0	12,50	1,99157	0	0
25	5	+ 0,38268	+ 38	12,12	208	+ 51	25,5
50	10	+ 0,70711	+ 71	11,79	251	+ 94	47
75	15	— 0,38268	— 38	11,58	278	+ 121	26
100	20	+ 0,92388	+ 92	11,50	288	+ 131	60,5
125	25	+ 1	+ 100	11,58	278	+ 121	65,5
150	30	+ 0,92388	+ 92	11,79	251	+ 94	60,5
175	35	+ 0,70711	+ 71	12,12	208	+ 51	47
200	40	+ 0,38268	+ 38	12,50	157	0	25,5
225	45	0	0	12,88	105	— 52	0
250	50	— 0,38268	— 38	13,21	058	— 99	26
275	55	— 0,70711	— 71	13,42	028	— 129	49,5
300	60	— 0,92388	— 92	13,50	016	— 141	64,5
325	»5	— 1	— 1	13,42	028	— 129	70,5
350	70	— 0,70711	— 92	13,21	058	— 99	64,5
375	75	— 0,92388	— 71	12,88	105	— 52	49,5
400	80	— 0,00000	0	12,50	157	0	0

2° — Adoptons maintenant des valeurs de i comprises entre 0 et 5 (puisque les inclinaisons des clichés sont toujours inférieures à 5) avec un échelon convenable. — Soient $i_2, i_3, i_1, \dots$ ces valeurs. Enfin construisons comme cela a été exposé dans le 1° les courbes correspondantes et les cotes $i_1, i_2, i_3, \dots$ etc...

3°. — *Application.* — Sur le cliché les points ont été choisis sur un cercle de 10 cm. de rayon avec le point principal comme centre. La focal f de l'appareil de prises de vues étant telle que :

$$\text{tg } \alpha = \frac{0.10}{f}$$

$$\text{d'où } \alpha = 12 \text{ G } 50 \text{ environ}$$

$$\text{et } \log \alpha = 1,99157$$

Proposons-nous de construire un élément de la famille des courbes, celui correspondant à la valeur $i_1 = 1 \text{ grade}$.

Préalablement adoptons ceci :

$$\mu_1 = 1/5 \text{ m/m, l'unité étant le grade.}$$

$\mu_2 = 1/2 \text{ m/m}$, l'unité représentant la cinquième décimale des logarithmes.

$$A = \log \cos \alpha = 1.99157$$

$$B = \alpha = 12 \text{ G. } 50$$

$$C = i_1 = 1 \text{ G}$$

$$S = (B - C \sin \frac{x}{\mu_1})$$

On peut constituer un tableau qui n'est que la stricte application de l'équation III, recherche des valeurs de y en fonction des valeurs échelonnées de x . (Voir page précédente).

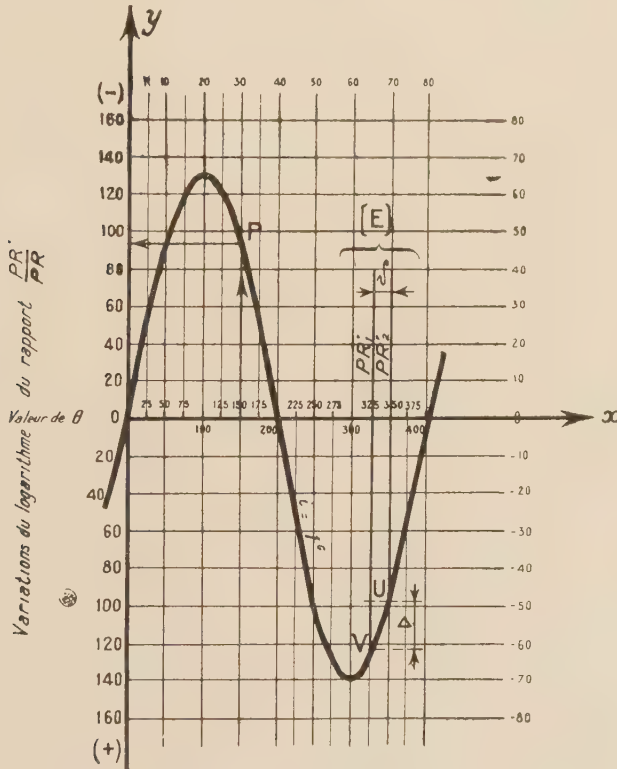


Fig. 19. Construction d'une courbe de l'abaque.

Pour la construction de la courbe, on a appliqué ces différentes valeurs au moyen du quadrillage centimétrique coté en dehors des axes. Quant aux échelles, elles ont été graduées avec les modules précédemment définis. La rapport Ox contient les valeurs de θ ; le support Oy

contient les valeurs de $\log \frac{PR'}{PR}$.

Soit un cas particulier, celui matérialisé par les 2 flèches. Il exprime que pour une inclinaison du cliché de 1 grade, pour des valeurs de α voisines de 12 G 50, un vecteur PR' ayant un gisement de 150 G par rapport à PR pris comme origine (6) et tel que

$$\log PR' - \log PR = -93 \text{ (en unités du 5}^{\text{me}} \text{ ordre).}$$

Remarque sur cette application :

On peut se proposer de résoudre le problème suivant : On connaît l'inclinaison du cliché : 1 grade. On connaît $\alpha = 12 \text{ G } 50$. On connaît 2 valeurs de PR' (PR'_1 et PR'_2) correspondant à 2 vecteurs quelconques faisant entre eux un angle γ . Trouver les gisements de PR' et de PR'_1 par rapport à PR .

La solution graphique est immédiate (voir la partie E de la figure 19).

1°. — Reporter sur calque 2 droites parallèles entre elles et distantes d'une quantité ϑ mesurée avec l'échelle Ox de l'abaque; 2°. — Sur ces 2 droites, fixer 2 points (U sur la première, V sur la seconde), distants suivant Oy d'une quantité $\lambda = \log PR'_2 - \log PR'_1$ (en unités du 5^{me} ordre) et mesurée suivant l'échelle Oy de l'abaque; 3°. — Promener le calque sur le graphique, les 2 droites parallèles entre elles restant constamment parallèles à Ox et assurer simultanément le contact de U et de V avec la courbe. Dans le cas présent on lit : gisement de $PR'_1 = 325 \text{ G}$; gisement de $PR'_2 = 350 \text{ G}$.

Mais il y aurait plusieurs solutions. Et cela exprime qu'il n'est pas possible de redresser un cliché aérien d'inclinaison connue avec 2 points au sol. Comme nous le verrons par la suite, un troisième suffirait à lever l'indétermination.

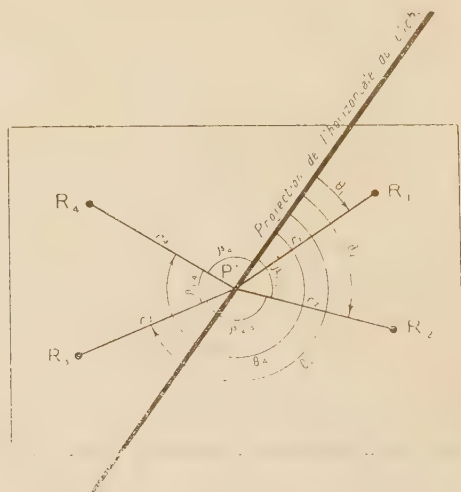


Fig. 20. Distribution des points de redressement sur un cliché.

6) N'oublions pas que PR représente la trace sur le sol l'horizontale du cliché passant par le point principal.

VOYONS MAINTENANT CE QUI SE PASSE DANS LA PRATIQUE :

1°. — *L'appareil de prises de vues* est correctement réglé; on connaît sa focale exacte et on a la possibilité, grâce aux repères de chambre de définir la position exacte du point principal p du cliché. Les points de redressement sont choisis à peu près sur un même cercle (de 10 centimètres de rayon par exemple) (7). Soient 1, 2, 3, 4 (figure 17) ces points de redressement finement piqués. On relèvera sur le cliché, avec une précision de l'ordre du $1/50$ de m/m (8) les longueurs.

2°. — *Les points homologues du terrain* (R_1, R_2, R_3, R_4 et P , fig. 20) sont relevés topographiquement, avec une précision de l'ordre du décimètre. On sait que généralement les opérations topométriques sont menées dans le but d'obtenir en définitive les coordonnées de ces points; il est donc facile, en partant de ces coordonnées de calculer les longueurs r'_1, r'_2, r'_3, r'_4 et les angles $\beta_{34}, \beta_{41}, \beta_{12}, \beta_{23}$, d'où aussi les quantités

$$r''_1 = r'_1 \quad r''_2 = r'_2 \times \frac{p_1}{p_2} \quad r''_3 = r'_3 \times \frac{p_1}{p_3} \quad r''_4 = r'_4 \times \frac{p_1}{p_4}$$

que l'on eût obtenues si les points de redressement avaient été rigoureusement choisis sur un même cercle de rayon R_1 .

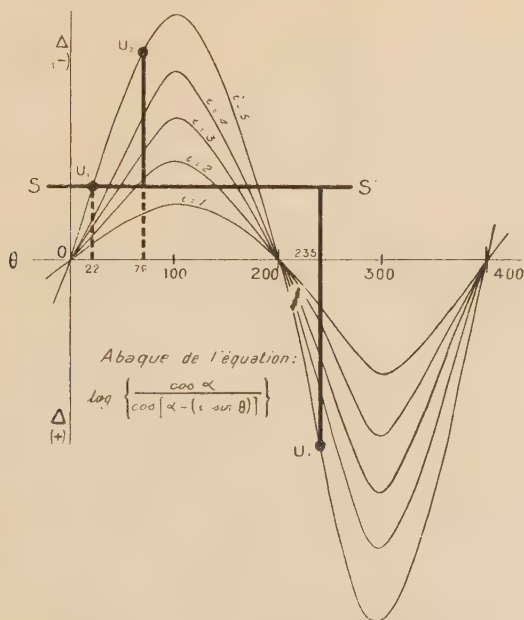


Fig. 21. Schéma de l'abaque recherché.

7) Dans le cas où l'on travaille sur plaques 18 x 24.

8) Précision homogène avec celle autorisée par le grain des plaques modernes utilisées en photographie aérienne ($1/35$ de m/m environ).

3°. — *Appliquons à un cas concret.* — La figure N° 21 représente un abaque pour des valeurs de i égales à 1, 2, 3, 4 et 5 grades. Nous venons de voir que les distances r'_1 et r'_2 étaient devenues r''_1 et r''_2 et l'on a par application d'une formule précédemment énoncée

$$\begin{aligned}\log r''_1 - \log r &= \log \cos \alpha - \log \cos (\alpha - i \sin \vartheta_1) \\ \log r''_2 - \log r &= \log \cos \alpha - \log \cos (\alpha - i \sin \vartheta_2)\end{aligned}$$

$$\text{d'où} \quad \log \frac{r''_1}{r''_2} = \log \frac{\cos [\alpha - i \sin (\vartheta_1 + \beta_{12})]}{\cos [\alpha - i \sin \vartheta_1]}$$

On peut évaluer numériquement la valeur de $\log \frac{r''_1}{r''_2} = \Delta_{1,2}$

Le problème se ramène alors à rechercher sur l'abaque ci-dessus deux points U_1 et U_2 dont la différence d'ordonnée est $\Delta_{1,2}$ et dont la différence d'abscisses est $\beta_{1,2}$. Avec 2 points il y a plusieurs solutions, mais un troisième point U_3 lève l'indétermination.

Dans la pratique, il faudrait reporter sur un papier calque le système SS' (gros trait plein ou tireté de la figure) et adoptant pour les Δ et pour les β les mêmes échelles que celles adoptées pour la construction de l'abaque. On promène le calque sur celui-ci jusqu'à coïncidence des points U_1 , U_2 et U_3 avec une même courbe i , SS' restant constamment parallèle à l'axe des x . On lit enfin par rabattement, outre l'inclinaison du cliché le gisement des droites $P'R_1$, $P'R_2$, $P'R_3$, avec l'horizontale du cliché comme origine, d'où la position de cette horizontale par rapport à l'image, d'où enfin la position de la ligne de plus grande pente.

E. GENERALITES SUR DEUX QUESTIONS INTERESSANT LEREDRESSEMENT ET AYANT FAIT L'OBJET D'ETUDES PERSONNELLS.

I. — Préparation des vols.

II. — Les vols à haute altitude.

I. — PREPARATION DES VOLS.

Qu'il s'agisse d'une mission photo-aérienne en vue de l'établissement de plans basés sur le simple redressement (plans de villes plans pour déviation de routes, plans pour assainissement de vallées, de plaines... etc... où la définition de l'altimétrie est opérée par les méthodes classiques de la topométrie) ou bien que cette même mission soit destinée à établir des canevas de triangulation aérienne sur lesquels seront basées toutes les opérations ultérieures, nous avons toujours pensé que la pré-

paration des vols devait être effectuée avec la plus grande minutie, au moyen d'instruments ou de graphiques très maniables, très simples, et qu'ensuite le choix du matériel volant devait faire l'objet d'une sélection aussi judicieuse que possible. Qu'on nous permette ici de résumer nos idées personnelles à ce sujet et de donner la théorie et la description d'un abaque que nous avons spécialement établi en 1935 pour les besoins de la Société Générale de Photo-Topographie. Comme chacun le sait, le moyen le plus approprié à l'heure actuelle pour élever et véhiculer l'appareil de prises de vues est incontestablement l'avion, mais dans certains cas particuliers et très limités, le dirigeable semble présenter une certaine supériorité par son rayon d'action, sa plus grande stabilité, son intérieur spacieux et la possibilité de régler sa vitesse pour des prises de vues à très basse altitude (ces vues pouvant être prises simultanément l'une à la proue, l'autre à la poupe). Nous laisserons de côté dans cette étude les engins périmés ou trop spéciaux (ballons libres, ballons captifs, cerfs-volants) ou peu sérieux (chambre élevée au moyen d'une catapulte à l'air comprimé puis redescendue en parachute, l'exposition ayant lieu à ce moment, pigeons voyageurs) de même que les solutions émises « a priori » par des précurseurs trop zélés (planeurs à moteur de faible puissance, hélicoptères etc...) de même nous négligerons l'aspect « militaire » de la question.

Il n'existe pas à proprement parler en France, dans l'aéronautique civile, d'avions spécialement aménagés pour les prises de vues aérophotogrammétriques ce qui s'explique d'ailleurs par le fait que les entreprises privées n'ont pas à effectuer une somme suffisante de travaux leur assurant le minimum d'heures de vol nécessaire pour amortir un tel matériel. La solution consiste alors à rechercher dans la gamme des avions modernes qui sont sur le marché ceux qui s'adaptent le mieux à nos travaux. J'ai montré à ce sujet dans une précédente publication (la photogrammétrie et le géomètre en France, Journal des Géomètres-Experts et Topographes Français, N° 169, 1934) que, pour l'exécution de ses travaux courants, une entreprise de photographie aérienne n'a aucun intérêt à avoir ses avions particuliers, car, dans le cas contraire, ou bien elle limite ses possibilités à quelques types vites démodés, ou bien la charge qu'elle doit supporter est trop lourde pour elle. Les maisons d'aviation ne demandent qu'à louer leur matériel; elles offrent en même temps leur connaissance de l'air, elles fournissent d'excellents pilotes qui s'adaptent très vite aux vols de haute précision, débarrassant ainsi le photographe aérien d'un très gros souci et lui permettant d'améliorer sa technique, d'étendre son activité et de mieux vivre. Or, il faut bien se dire que, s'il ne nous est pas possible de disposer actuellement d'avion idéal, c'est-à-dire construit spécialement pour les buts proposés, pour le matériel de prises de vues, et pour sa manipulation, on peut, par de judicieuses adaptations de types existants réunir la plupart des conditions indispensables à la marche rationnelle des missions.

Enumérons ces conditions: *Eu premier lieu*, une visibilité maximum. L'idéal serait d'avoir une cabine presque entièrement vitrée, tout à fait en avant de l'avion, où le pilote et l'opérateur, assis côte à côte pourraient, avec le minimum de masques, voir le paysage en avant, à droite, à gauche et au-dessous. Car rien ne vaut l'observation directe du terrain.

Avec les avions courants, cette disposition n'existe pas: s'il s'agit de « conduites » intérieures il faut rechercher de préférence celles qui sont munies de larges baies vitrées latérales: en tous les cas l'aménagement dans le plancher d'une trappe d'observation aussi grande que possible est particulièrement recommandé. *En second lieu:* maximum de confort et de sécurité. Nous verrons plus loin les exigences de la restitution en matière de recouplement des photographies surtout lorsqu'il s'agit de stéréogrammes, et, nous avons d'autre part, énuméré les précautions à prendre pour l'obtention de clichés suffisants. On peut donc penser que le rôle d'observateur photographe est particulièrement délicat et qu'il faille éviter à tout prix que des difficultés provenant de l'avion ou du vol (froid, vent, bruit, installation défectueuse du matériel, risques d'accidents) viennent compliquer sa tâche. Parmi les avions modernes, même à faible puissance, il en existe de très confortables à cabine hermétiquement fermée (voire même chauffée) facilement aménageables pour recevoir l'appareil de prise de vues, les magasins et les accessoires divers. Grâce aux progrès réalisés dans la technique des moteurs, les bruits provoqués par ceux-ci ont pu être considérablement atténués au point de rendre facile — chose extrêmement importante — les conversations entre le pilote et l'observateur. Quant à la sécurité, quoique les missions photographiques s'effectuent généralement par beau temps, il convient de ne rien négliger à cet égard; il importe en particulier de s'adresser aux maisons d'aviation dotées, au point de vue mécanique, entretien et navigation, d'un personnel de premier ordre et de plus ayant suffisamment d'envergure pour pouvoir fréquemment moderniser leur matériel; et dans ce même ordre d'idées nous constaterons qu'il faut aussi savoir s'imposer une petite discipline personnelle — qui d'ailleurs devrait être de règle — et consistant simplement à se munir dans tous les cas d'un parachute périodiquement révisé.

Les autres conditions à remplir dans le choix d'un avion photogrammétrique dépendent alors de la mission à effectuer: avion léger et d'un prix horaire très bas pour les petites superficies, avion de forte capacité et de grand rayon d'action pour les vols importants, avion susceptible de voler normalement à de hautes altitudes pour les petites échelles, avion colonial, avion laboratoire etc..., chaque type nécessitant évidemment une étude spéciale.

En ce qui concerne le détail de l'aménagement extérieur, il faut remarquer que tant qu'il s'agit de vols normaux, les accessoires de bord généralement utilisés (clinomètres transversaux et longitudinaux, altimètres ou barographes, compas compensés, cinémo-dérivomètres) sont suffisants pour les buts photogrammétriques. Si dans certains cas spéciaux l'observateur a besoin de données précises sur tel ou tel élément du vol, (altitude, direction) il n'a qu'à se munir de l'appareil de mesure qui convient à cet effet. Nous verrons d'ailleurs un peu plus loin les dispositions spéciales à prendre pour les vols à haute altitude. Dans un autre ordre d'idée, il y a enfin lieu d'examiner de très près l'emplacement de l'appareil photographique dans l'avion ainsi que son montage; ceci à cause des *vibrations*. On sait que les mouvements vibratoires communiqués à l'avion et les réactions de l'air — mouvements absolument désordonnés — sont inégalement répartis et que, par conséquent, il

existe sur la surface du plancher des zones où les vibrations sont minima: c'est dans ces zones — dans la mesure où elles répondent à une percée possible et où elles s'adaptent bien à l'aménagement d'ensemble — qu'il faut rechercher l'emplacement de l'appareil de prise de vues. Pour éliminer alors définitivement ces vibrations dont l'influence *rend inutilisables les clichés photogrammétriques*, on isole l'appareil au moyen de dispositifs spéciaux (chambres à air, bandes de caoutchouc mousse,

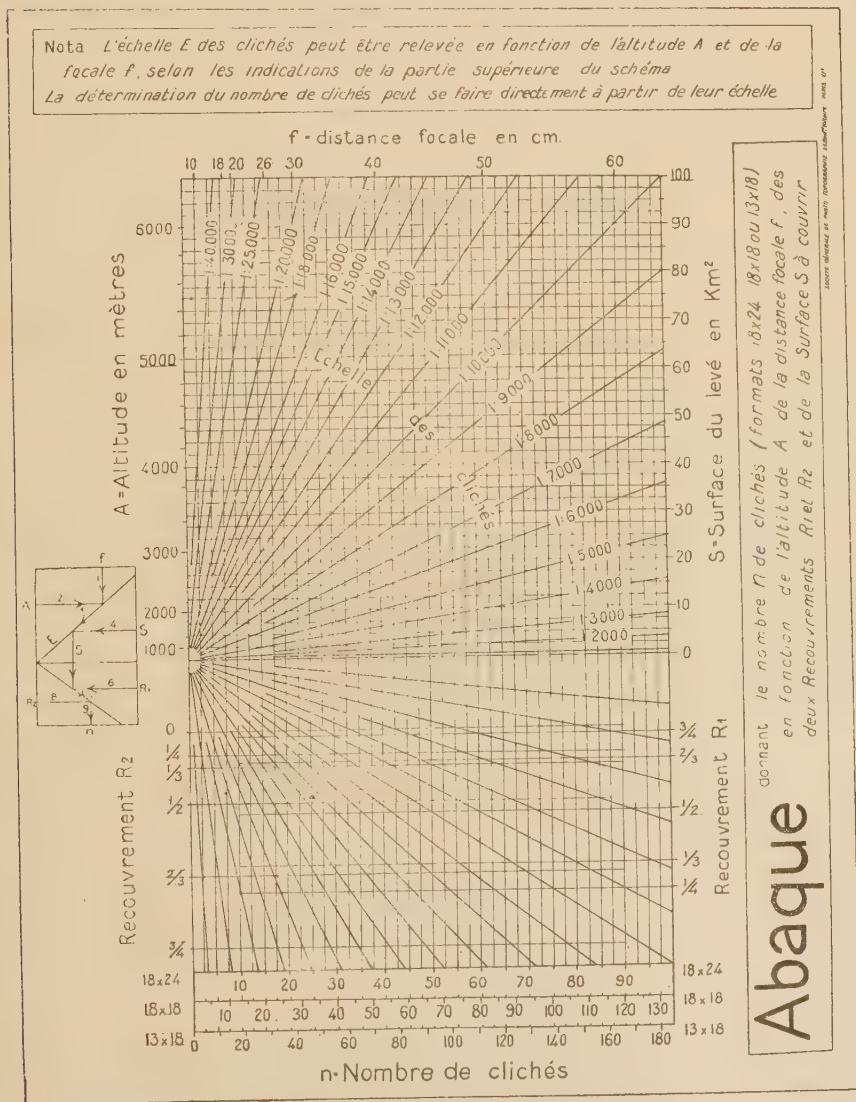


Fig. 22.

Abaque pour la préparation des missions aéro-photogrammétriques.

suspensions à ressorts, etc...). Se rattachant enfin au matériel de navigation aérienne, il convient de signaler que l'exécution des missions photographiques pose des problèmes relatifs aux *terrains d'atterrissages* (insuffisants en France et inexistantes aux Colonies) à la reconnaissance de *terrains de secours* ou intermédiaires, à l'aménagement de hangars pour le matériel et le personnel — cas des pays neufs —, de *laboratoires*, d'*ateliers*, à l'*approvisionnement* en vivres, matériaux et combustibles, questions très complexes nécessitant une mise au point absolument irréprochable.

En ce qui concerne la *préparation des missions aérophotogramétriques*, les données du problème sont les suivantes: 1° — Délimitation de la zone de travail sur carte ou sur document quelconque; 2° — Définition du travail à exécuter. Le processus de la solution comprend: 1° — Choix de l'appareil de restitution, d'où l'appareil de prises de vues correspondant; 2° — En fonction de l'appareil de restitution, détermination de l'échelle des clichés, de leur recouvrement dans le sens longitudinal et latéral, et des qualités photographiques à rechercher; 3° — d'où finalement calcul de l'altitude de vol, établissement des plans de vol et conditions techniques diverses particulières au travail proposé.

L'abaque ci-dessus (figure 22) donne: 1° le temps t entre deux déclenchements successifs en fonction de R (recouvrement longitudinal) de l'échelle du cliché E et du temps T mis à parcourir sur le terrain une base de longueur D ; 2° la distance d'entre les axes longitudinaux ou transversaux en fonction du format du cliché, des 2 recouvrements et de l'échelle E .

Considérons la partie du graphique ci-dessus faisant l'objet du schéma A.

a) *Etablissons l'équation du faisceau de courbes de la partie inférieure:*

Module adopté sur Ox (support de D) longueur de la base en kilomètres = μ_1 .

Module adopté sur Oy (support de T , temps mis à parcourir la base = μ_2 .

D

Relation à représenter: $T = \frac{D}{V}$ (1), V étant la vitesse de l'avion par rapport au sol.

$$\text{Posons } x = \mu_1 D \quad \text{d'où } D = \frac{x}{\mu_1}$$

$$y = \mu_2 T \quad \text{d'où } T = \frac{y}{\mu_2}$$

Avec ces conventions (1) devient

$$\frac{y}{\mu_2} = \frac{x}{\mu_1} \times \frac{1}{V} \quad \text{d'où } y = x \frac{\mu_2}{\mu_1 V}.$$

Chaque courbe correspondant à une valeur particulière de V est une droite passant par l'origine et son coefficient angulaire est.

$$\frac{\mu_2}{\mu_1 V}$$

b) *Etablissons l'équation du faisceau de courbes de la partie supérieure.*

Relation à représenter: $18 R = \frac{D'}{E}$ dans laquelle R est le recouvrement des clichés dans le sens longitudinal, D' la longueur au sol figurée par la partie utile de chaque cliché, E l'échelle des clichés. Les R seront portés sur l'axe des y et les D' sur l'axe des x. Remarquons d'abord qu'il est intéressant d'adopter pour les D' le même module μ_1 que celui adopté précédemment pour les D.

Soit μ_3 , le module adopté pour les R.

Pesons

$$\begin{aligned} x &= \mu_1 D' & \text{d'où } D' &= \frac{x}{\mu_1} \\ y &= \mu_3 R & \text{d'où } R &= \frac{y}{\mu_3} \end{aligned}$$

la relation (II) devient

$$\frac{18 y}{\mu_3} = \frac{x}{\mu_1 E} \quad \text{d'où } y = x \frac{\mu_3}{18 \cdot \mu_1 E}$$

chaque courbe correspondant à une valeur particulière de E est une droite passant par l'origine et son coefficient angulaire est

$$\frac{\mu_3}{18 \cdot \mu_1 \cdot E}$$

Remarque:

Le fait d'avoir adopté pour les D' et pour les D le même module constituait une échelle linéaire sur Ox, permettant de lier les 2 relations

$$T = \frac{D}{V} \text{ et } 18 R = \frac{D'}{E}, \text{ conformément au schéma A.}$$

Quant à la partie de l'abaque faisant l'objet du schéma B, contentons-nous d'en faire une application. On connaît : Revouvrement latéral $R = 1/2$, échelle des clichés $E = 1/5000$; format des clichés dans le sens latéral $F = 12$ cm. En suivant dans l'ordre 1, 2, 3, 4, 5 les indications du schéma B, on trouve; distance entre les lignes de vol $d = 300$ mètres.

(dans les limites où le coefficient K ne devient pas exagéré) de couvrir par cliché une superficie de territoire proportionnelle au carré de K et par conséquent: 1° de diminuer considérablement le nombre de clichés; 2° de réduire le temps du vol; 3° de nécessiter des travaux au sol plus larges et par conséquent moins onéreux.

Pressenti, d'autre part, par le *Service Géographique de l'Armée*, désireux d'obtenir des clichés dont l'échelle devait varier entre le 1/30.000 et le 1/40.000 pour l'établissement de la nouvelle carte de France au 1/50.000, nous avons depuis 1935 étudié de très près la délicate question des vols photogrammétriques à haute altitude et nous résumerons ici les conclusions de nos investigations.

Par vols à haute altitude nous entendrons ceux compris entre 3.500 et 8.000 mètres environ, la limite inférieure étant celle où l'état de l'atmosphère commence à modifier profondément les conditions du vol, la limite supérieure étant imposée par la discrimination des détails à figurer sur la carte. Atteindre une altitude de l'ordre de 6.000 mètres et y prendre une photographie n'est rien; y travailler normalement est autre chose! Les difficultés essentielles résident dans la *dépression* (action sur la respiration et sur l'organisme en général) et dans la *baisse de température* (jusqu'à -40° dans certains cas). Les difficultés secondaires tiennent au *matériel volant*, au *matériel d'exécution*, à l'*équipement du personnel*, à la *navigation*, aux *observations proprement dites*. Ensemble, elles posent des problèmes très complexes dans les domaines technique, économique et pathologique et c'est l'examen de quelques uns d'entre eux qui fera l'objet de ce qui va suivre:

a) *Préparation de la mission*: Il y aura lieu dans la préparation de la mission au bureau, de tenir compte des facteurs suivants : temps global (montée + travail + descente), possibilités physiques du pilote et de l'observateur, altitude à ne pas dépasser pour que le pilote reste maître de ses lignes de vol (10). Outre cette altitude on pourra évaluer avant le départ l'équidistance entre les lignes de vol; tous les autres éléments (temps devant s'écouler entre deux déclenchements successifs, cap, dérive) *très variables à cause de l'instabilité des couches d'air aux hautes altitudes*, se calculant par abaques « sur place » en parcourant une base convenable, l'opération pouvant être réitérée s'il y a lieu.

b) *Choix de l'avion*: Le problème est le suivant: atteindre l'altitude moyenne de 7000 mètres avec une marge de 1500 à 2000 mètres, le chargeement se composant du pilote, de l'observateur (11) et du matériel; arrivé à cette altitude, être en mesure de travailler confortablement pendant 2 ou 3 heures; disposer d'une vitesse suffisante pour lutter contre les vents dont la vitesse varie généralement entre 50 et 100 km. heure, avoir le maximum de sécurité en ce qui concerne la résistance de l'avion placé dans les conditions météorologiques particulières à ces altitudes; le tout réalisé aussi économiquement que possible afin d'aboutir à des

10) A noter que cette altitude est bien au-dessous du «plafond théorique de l'avion».

11) L'automatisme intégral ne nous paraissant, pour le moment du moins ni souhaitable, ni réalisable, nous admettons la présence obligatoire d'un observateur ayant au moins quelques notions de restitution photogrammétrique.

prix de revient permettant de ne pas perdre dans le vol le bénéfice de la méthode photogrammétrique.

La difficulté est de concilier judicieusement ces éléments et la gamme des avions français actuellement sur le marché permet difficilement d'aboutir à une solution satisfaisante. Deux types d'avions bi-moteurs présentés précédemment (*Caudron-Renault Goëland* et *Farman 431*), auxquels nous ajouterons pour les vols compris entre 3500 et 6000 mètres le *Simoun Caudron Renault*, paraissent donner satisfaction. Conditions essentielles à remplir: *Moteur à compresseur* pour utilisation de toute la puissance du moteur dans un air raréfié, *cabine spacieuse, confortable et chauffée, grande visibilité* vers le sol et en avant pour le pilote et l'observateur.

COMPARAISON DES COURBES DE DÉBIT

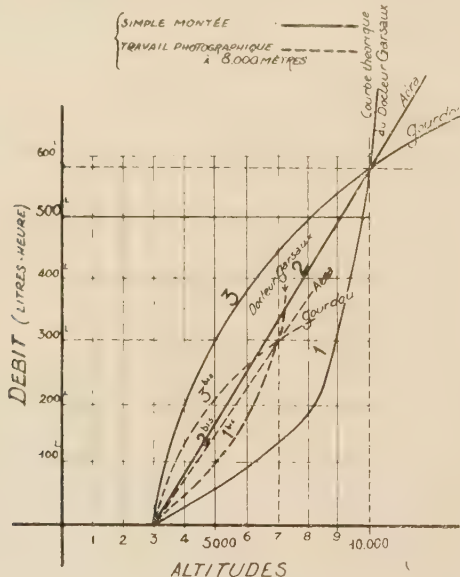


Fig. 24.

Relation entre la dépression atmosphérique et les débits d'oxygène.

c) *La dépression atmosphérique et l'organisme*: Une question extrêmement importante et généralement très négligée parce que ses conséquences ne sont pas immédiates est celle qui a trait à la façon dont se comporte l'organisme aux hautes altitudes. Comment est-il possible de vaincre les effets de la dépression atmosphérique? Cette question étant du domaine de la pathologie, il était normal, pour y répondre correctement, de consulter un médecin-spécialiste. Nous avons pensé que le Docteur GARSAX (12), Directeur des Services médicaux de l'aviation ci-

12) Rappelons brièvement que le Docteur Garsaux avait déjà étudié la question pendant la guerre moment où il avait conçu un premier modèle réduit de caisson pneumatique à l'Institut Aéronautique de Saint-Cyr. En 1922, il inaugurait au Bourget un autre modèle perfectionné qui lui a permis de réussir les essais les plus concluants.

vile au Bourget, était particulièrement qualifié pour nous donner des directives à ce sujet. Le Docteur GARSAX nous a fait part des expériences réalisées par lui grâce à son *caisson pneumatique* (sorte de coffre étanche dans lequel est enfermé le sujet à observer et où il est possible de réaliser les pressions et températures correspondant à des altitudes comprises entre 0 et 20.000 mètres). Ses conclusions sont les suivantes: « Il est indispensable qu'à partir de 3500 mètres l'homme commence à respirer de l'oxygène artificiel et cette consommation n'est pas nécessairement proportionnelle à l'altitude. Deux cas d'ailleurs sont à envisager: 1° simple montée, 2° travail photographique à une altitude déterminée. Le graphique représenté (fig. 24) donne d'ailleurs (courbes 1 et 1-bis) un ordre de grandeur des consommations théoriques, pour une montée à 10.000 mètres d'une part, pour effectuer un travail à 7.000 mètres d'autre part. Les courbes 2, 2-bis, 3, 3-bis, donnent les débits respectifs des *inhalateurs* (13 « Aéra » et « Gourdou » après réglage. Comme on le constatera facilement, les différences d'ordonnées accusent des excédents de consommation et nous font préférer la conception « Aéra ». La courbe théorique du docteur GARSAX s'infléchit davantage aux environs de 8000 mètres car, c'est à partir de cette altitude qu'il convient de distribuer largement l'oxygène. L'inhalateur idéal serait en somme celui dont la courbe de débit se rapprocherait le plus de cette courbe théorique en ménageant bien entendu une marge de sécurité.

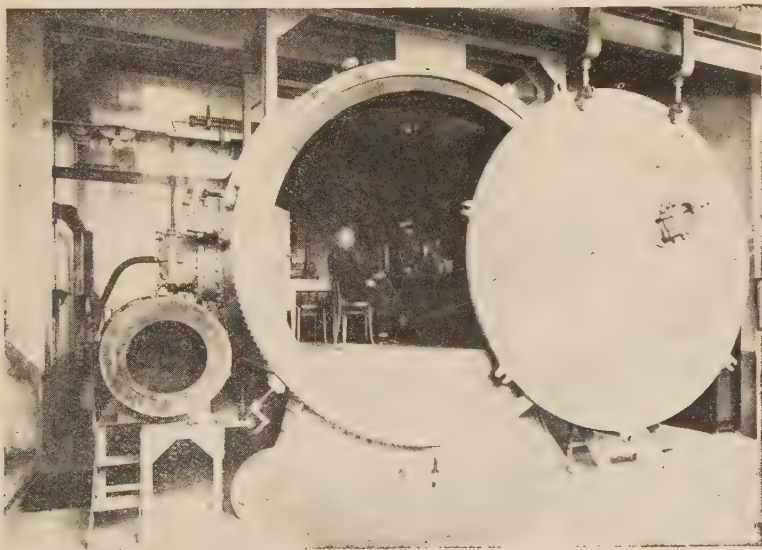


Fig. 25. Examen des effets de la dépression atmosphérique et du froid dans le caisson pneumatique.

13) Le système de distribution d'oxygène comprend: une bouteille métallique un inhalateur, un masque. L'inhalateur a pour effet de régulariser la distribution; dans ce but, à l'intérieur un détendeur a pour effet de ramener le gaz à une pression sensiblement constante.

Bien des choses seraient encore à prévoir, examiner, mettre au point, si nous voulions approfondir la délicate question des vols de précision à haute altitude. Nous pourrions, en particulier, nous tourner du côté des instruments de prise de vues (automatiques ou non), du côté des magasins (simples ou à grande capacité), du côté des obturateurs et porter un jugement après épreuve: tant de choses admirables au laboratoire, deviennent impraticables à 7.000 mètres quand le froid, le vent, la brume... la malchance s'en mêlent! Mais il est inutile, dans cet ordre d'idées de passer tout en revue pour tirer une conclusion logique que nous exprimerons ainsi: la prise de vues aériennes à haute altitude destinées aux travaux photogrammétriques est une opération très complexe à cause de la multiplicité des facteurs d'ordre technique, économique et pathologique qui concourent à sa réussite et l'on sait que la plus petite défaillance est de nature à compromettre l'ensemble. Recherchons donc la simplicité dans les détails: simplicité dans le matériel de navigation, simplicité dans les instruments, simplicité dans les gestes; évitons les observations et les calculs compliqués qui peuvent se résoudre « à vue » avec du flair et un peu de bon sens; et en règle générale, ne nous berçons pas trop de cette douce illusion qui tend à faire croire que la machine peut se substituer à l'homme. La photographie aérienne de précision à haute altitude en est à ses débuts, en France comme à l'étranger; mais elle a un avenir immense. Si des erreurs sont commises et si après beaucoup de peine les résultats ne sont pas ceux que nous escomptions, prenons ce mal en patience et espérons, sans cesser de poursuivre inlassablement nos efforts: La réussite est à ce prix!

CONCLUSIONS

Les problèmes de *photo-topographie par clichés considérés isolément*, à l'étude desquels nous nous sommes efforcé de contribuer au cours de la présente thèse (Etablissement théorique de plans photographiques en terrain accidenté. Redressement des clichés par le calcul et par abaque. Préparation des missions aérophotogrammétriques et vols à haute altitude) *répondent à un but économique bien défini et nous les avons traités par nécessité de métier.*

Pour en comprendre toute la portée, il importe d'abord d'énumérer et de caractériser les Sociétés Françaises de photo-topographie en fonction depuis la guerre:

a) *Sociétés exploitant les procédés de Redressement:*

Société Générale de Photo-Topographie (14); Compagnie Aérienne Française; Entreprises de Photo-Aérienne MOREAU; Photo-Aérienne Marcel CHRÉTIEN.

b) *Sociétés exploitant les procédés de stéréo-photo-restitution:* Société Française de Stéréophoto-Topographie.

c) *Société exploitant les procédés de la double projection (Méthode Ferber) :* « L'Aéro-topographie ».

Nous nous tournerons seulement du côté de la catégorie (a) et nous examinerons les différentes catégories de travaux effectués ou à effectuer par ces Sociétés.

a) *Etablissement des plans de Villes* par application des lois du 14 Mars 1919 et 19 Juillet 1924 (aménagement, embellissement, assainissement et extension). Echelles obligatoires: 1/2000 et 1/5.000. Depuis la guerre, plus des 3/4 des villes françaises de plus de 10.000 habitants ont eu leurs plans topographiques faits par les procédés du *redressement*; ajouter à ceci une grosse partie des stations balnéaires ou climatiques, quel que soit leur nombre d'habitants.

b) *Plans d'usines, de domaines, de forêts, de ports, de gares.* Echelles variant généralement entre le 1/500 et le 1/2.000. Assez difficile de chiffrer le chiffre d'hectares global correspondant à ces travaux (effectués généralement à la demande) mais qui paraît très considérable.

c) *Plans cadastraux.* Rappelons à ce sujet ce que nous avons déjà écrit (15): « *Le Service de la Révision des Evaluations Foncières* », crée en 1930 pour la mise à jour des plans cadastraux, après avoir recherché les zones de territoire dans lesquelles il lui semblait « à priori » qu'il pouvait avoir intérêt à utiliser la photogrammétrie, confia à l'entreprise privée des prises de vues avec redressement soit sur fonds de plans ca-

14) M. Martin, Directeur Technique. M. Carlier, Directeur Administratif.

15) « Procédé pratique d'établissement de plans topographiques en terrain accidenté ». Mémoire présenté en Mars 1937 en vue de l'obtention du diplôme d'études expérimentales de sciences appliquées ».

dastraux, (soit sur canevas préalables)... Le nombre total d'hectares confiés à l'entreprise privée au cours de la période 1933-1936 fut de 390.767 parmi lesquels 137.777 ont été exécutés par la Société Générale de Photo-Topographie, et, tout nous porte à penser qu'au cours des années à venir des travaux similaires seront à exécuter suivant ce même rythme...

Ajoutons à ceci, l'usage fait de la photogrammétrie (par clichés isolés) d'une part par l'entreprise *Marcel Chrétien* en *Indo-Chine* (1924-25-26), par *M. Duraffourd*, Régisseur du cadastre en *Syrie*, par *M. Wind*, Ingénieur du Service topographique du *Siam*. Constatons les tentatives actuelles faites au *Service topographique shériffien* et en *Tunisie*. Rappelons les résultats obtenus en France par *M. Roussilhe* alors qu'il était Directeur du Service d'Etudes du Cadastre au Ministère des Finances (1923-1928) et qu'il se livrait à des essais de mise à jour rapide du Cadastre dans l'Oise, l'Aisne et l'Aube: 24 communes, 18976 hectares, 44160 parcelles... et essayons avec ces chiffres, avec ces renseignements de nous faire une idée du rôle considérable qu'a joué et que doit encore jouer le procédé du redressement dans l'établissement des plans cadastraux.



Fig. 26.

d) *Plans de déviations de routes*: La législation actuelle oblige les agglomérations traversées par une ou plusieurs routes nationales, d'en effectuer au plus tôt une déviation périphérique.

e) *Plans de servitudes pour les terrains d'aviation.* Par suite de dispositions récentes, de 300 à 350 terrains d'aviation doivent faire établir des plans de servitudes (plans de détails à l'échelle du 1/2.000, plans généraux à l'échelle du 1/10.000). L'établissement de ces plans n'est pas encore commencé.



Fig. 27. Une photographie des environs du cirque de Gavarnie.

f) *Mise à jour de documents existants.* (Agglomérations, plans topographiques, plans directeurs).

g) *Etablissement de plans topographiques* depuis le 1/1.000 jusqu'au 1/10.000 inclus.

h) *Vols à haute altitude* (entre 6000 et 6500 mètres) pour le Service Géographique de l'Armée, en vue de l'établissement de la nouvelle carte de France au 1/50.000. Environ 800.000 hectares photographiés par les Sociétés ci-dessus mentionnées.

Qu'on nous pardonne cette énumération peut-être un peu sèche dans une conclusion!... Nous avons vu en elle, non pas un document statistique, mais une suite d'arguments de nature à fixer, point par point, les idées, sur l'allure de la courbe représentative des applications de la photographie aérienne et de la méthode du redressement en France et dans ses Colonies... Que nous montre cette courbe? D'abord qu'on a beaucoup fait, qu'aucun fléchissement ne s'est produit! Ensuite qu'il reste énormément à faire!

Nous avons essayé d'autre part, dans la première partie de cette thèse, de montrer l'état actuel des instruments et des méthodes et nous avons esquissé des problèmes d'avenir. Ensuite nous nous sommes efforcé d'en résoudre quelques uns, ou tout au moins de poser les bases essentielles de leur résolution!

Puisse cette oeuvre imparfaite être comprise et poursuivie! En ce qui nous concerne, nous n'arrêterons pas là nos efforts! La science photogrammétrique, encore neuve et hésitante, et pour cela si attrayante, mérite qu'on s'y attache et que ceux qui par leurs fonctions la touchent de près ou de loin lui consacrent un peu d'eux-mêmes. Nous ne manquons pas à cette obligation.
